

图解天文学

宣焕灿 萧耐园 编著



南京大学出版社





图解天文学

宣焕灿 萧耐园 编著



责任编辑：孟庆生
责任校对：木　林
装帧设计：谢燕淞

ISBN 978-7-305-06722-8



定价：36.00元

图解天文学

宣焕灿　萧耐园　编著

南京大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

图解天文学 / 宣焕灿，萧耐园编著. —南京：南京大学出版社，2010.2

ISBN 978-7-305-06722-8

Ⅰ. ①图… Ⅱ. ①宣… ②萧… Ⅲ. ①天文学—高等学校—教学参考资料 Ⅳ. ①P1

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2010）第 021972 号

出 版 者　南京大学出版社
社　　址　南京市汉口路 22 号　邮编 210093
网　　址　http://www.NjupCo.com
出版人　左　健

书　　名　图解天文学
编　　著　宣焕灿　萧耐园
责任编辑　孟庆生　　编辑热线　025-83593497

照　　排　南京玄武湖印刷照排中心
印　　刷　南京大众新科技印刷有限公司
开　　本　787×960　1/16　印张 19　字数 368 千
版　　次　2010 年 2 月第 1 版　2010 年 2 月第 1 次印刷
ISBN　978-7-305-06722-8
定　　价　36.00 元

发行热线　025-83594756
电子邮件　Press@NjupCo.com
　　　　　Sales@NjupCo.com(市场部)

前　言

南京大学供全校学生自由选修的普通天文学课程开设已久，每周 2 学时，一学期授课时间略多于 30 学时。文科学生选此课程较多，也有部分理科学生。选读此课程的学生在成绩合格后将获得文化素质课的理科公选课 2 个学分。

开设此课程，任课教师一直未能找到一本取材恰当、篇幅适中而又深入浅出的教材。我们两人都先后讲授过天文系以及校公共选修课两个层次的普通天文学，对不同学生的教学要求及学生的接受能力相当清楚。在校系领导的关怀和校出版社的支持下，决定联手编撰这本教材。

该教材是面向以文科学生为主的非天文系学生，既不能刻意回避天球坐标系、时间计量、天文学探测手段以及宇宙学等方面较难理解的内容，把这本教材写成一本逐章介绍太阳系天体、恒星世界直至河外天体的科普书籍，又不能盲目追求深度，使听课学生感到难以理解，所以我们在该书的撰稿过程中力求突出以下几个特点：

(1) 注意配置大量插图，力求用图解和图示的方式让学生理解某些较深的天文学知识。本书配置了 300 多幅插图(包括黑白天文图片以及黑白和彩色的天文照片)，而且使每幅插图都与正文内容相关连。由于这一特色，因此本书的书名定为《图解天文学》。

(2) 尽量避免引入较多的抽象概念和公式，对不得不引入的公式，一般不做推导，只给出最后结果，并尽可能作出较通俗的解释。

(3) 天文学在迅猛的发展中，新进展、新成果层出不穷。本书力求展示 21 世纪甚至最近几年来天文学的新进展，如国际上超大型反射望远镜的研制，中国的 LAMOST(见第三章第二节)的研制，太阳系中卫星特别是木星卫星和土星卫星的大量发现，冥王星降格为矮行星和 2006 年国际天文学联合会第 26 届大会上对太阳系天体的最新分类方法(见第五章第五节)，太阳中微子失踪案的破解，银河系是棒旋星系的发现，星系中心的特大质量黑洞的存在，宇宙背景辐射极微小的各向异性的发现及其重要作用，哈勃常数的

准确测定和精确宇宙学的诞生……这些新进展，在本书有关章节中均作了介绍。

该书除具有上述三点特色外，同时阐述了天文学的实际应用，行文具有通俗性和趣味性，因而完全可以作为天文爱好者系统学习天文学的一本自学教材。

本书的绪论与前五章由宣焕灿撰写，后五章由萧耐园撰写，然后双方互审，提出修改意见。在交出版社之前，宣焕灿对全书做了一些技术性统稿工作。

在本书撰稿过程中，我们得到了许多人的帮助，书中引用了以往著作中的若干插图，故在此一并对以下朋友和同事致谢：中国科学院院士苏定强和方成，紫金山天文台刘炎，北京大学吴鑫基，北京天文馆温学诗，南开大学苏宜，香港太空馆叶赐权，南京炮兵工程学院张明昌，福建师范大学余明以及本系同事朱慈墭、胡中为等。我们还感谢南京大学天文系领导对本书的出版提供了资金支持，感谢我校出版社责任编辑孟庆生先生为本书的出版所付出的辛勤劳动。

宣焕灿　萧耐园

2009 年 11 月于南京大学天文系

目　录

绪　论 …… 1
第一章　天球坐标和天体的视运动 …… 15
　第一节　天球上的基本点和基本圈 …… 15
　第二节　两种天球坐标系 …… 17
　第三节　天体的周日视运动和太阳的周年视运动 …… 20
　第四节　太阳的上中天和下中天 …… 24

第二章　时间和历法 …… 27
　第一节　真太阳时、平太阳时和恒星时 …… 27
　第二节　世界时、区时与国际日期变更线 …… 32
　第三节　原子时与协调世界时 …… 35
　第四节　历　法 …… 37

第三章　天文学探测手段 …… 42
　第一节　电磁波谱和大气窗口 …… 42
　第二节　天文望远镜的光学系统 …… 44
　第三节　地面上的光学观测和红外探测 …… 53
　第四节　射电天文探测 …… 57
　第五节　空间天文探测 …… 67

第四章　地球和月球 …… 73
　第一节　固体地球与海洋 …… 73

第二节 地球大气和水的循环 …… 77
第三节 地球磁层与地球辐射带 …… 79
第四节 地球的极移、岁差、章动和潮汐 …… 81
第五节 月球的运动 …… 85
第六节 日食和月食 …… 90
第七节 月球的表面和内部结构 …… 95
第八节 月球的起源和演化 …… 102

第五章 行星、矮行星和太阳系小天体 …… 106
第一节 行星的运动 …… 106
第二节 类地行星 …… 110
第三节 巨行星 …… 118
第四节 远日行星 …… 125
第五节 矮行星 …… 130
第六节 太阳系小天体——小行星 …… 133
第七节 太阳系小天体——彗星和流星体 …… 135

第六章 太 阳 …… 143
第一节 概 况 …… 143
第二节 太阳大气 …… 151
第三节 太阳活动 …… 161
第四节 日地关系 …… 173

第七章 恒 星 …… 180
第一节 恒星的一般性质 …… 180
第二节 恒星的形成和演化 …… 194
第三节 双 星 …… 199
第四节 变星和致密星 …… 203

第八章 星团和星云 …… 224
第一节 星团和星协 …… 224
第二节 星际物质 …… 228
第三节 星 云 …… 231

第九章　星系和星系集团 …… 238
第一节　银河系 …… 238
第二节　河外星系 …… 244
第三节　星系团和超星系团 …… 262

第十章　宇宙学 …… 270
第一节　概　述 …… 270
第二节　主要现代宇宙模型 …… 277
第三节　大爆炸宇宙学 …… 281

参考文献 …… 293

绪　　论

一、什么是天文学

天文学是自然科学中的基础学科之一。它的研究对象是广袤无垠的太空中的天体与天体系统乃至整个宇宙。天文学观测和研究它们的位置、分布、运动、形态、结构、物理状态、化学组成、相互关系和起源演化。

地球也是宇宙空间中的一个天体，有关地球的学科如地球物理学、地球化学、地理学、地质学、海洋学和气象学等，它们都属于地球科学（简称地学）的不同分支，是以地球大气、地球表面或地球表层为对象进行研究的学科。若把地球当做一个整体，把它看做太阳系中的一颗行星，研究它的空间位置、运动和物理特性等则属于天文学的范畴；对原先来自太空的流星、流星雨和陨星等，虽然它们已降落到地球大气中或地面上，但对它们的研究依然属于天文学的范畴；而原先在地球上，后被人们发射到太空中的人造卫星和宇宙飞船等人造天体，对它们的运动轨道等方面的研究也属于天文学的范畴。

二、天文学的诞生

天文学是自然科学中诞生最早的一门学科。早在远古的新石器时代，埃及、巴比伦、中国和古印度等古代文明国家，由于发展原始农业和牧业的需要，天文学就诞生了。那时，为使农业获得好收成，畜牧业掌握好牧草的生长规律和牲畜的繁殖期，都需要人们知道季节的变化，掌握好节令，于是就产生了早期的历法。起初也许是物候历，即观察动物的蛰伏、候鸟的迁徙、植物的枯荣等物象定出的历法，但物候历会受到气象异常因素的影响，对节令的掌握往往不太准确，后来则逐渐过渡到更准确的观星象定季节的历法。例

如，在古埃及，人们很早就发现黎明前天狼星升起（称天狼星偕日升）之时，便是尼罗河即将泛滥之际，于是人们便撤离尼罗河两岸，让河水泛滥留下的淤泥给农田施肥，过几个月水退之后再去耕种。公元前13世纪时，埃及人已定出天狼星偕日升的周期，即一回归年的长度为365.25日。在中国，公元前475—前104年（战国初年至西汉太初元年）采用的古四分历所定出的回归年长度也是365.25日。在古巴比伦和古印度，也都有类似的历法。

有些史前时期的民族，虽然他们没有留下任何文献史料，但对他们留下的特殊建筑遗址的考察表明，他们也在探索一年中季节的变化。例如，英国索尔兹伯里平原上史前时期的巨石阵遗址便是一个重要例证。据考证，巨石阵是公元前1800—前1400年间某个时期的柏克人建造的，其主轴线指向夏至时日出的方向，如图1所示，从巨石阵中心看远处肿状石柱正巧对应于当地夏至日太阳升起的方向。也许当时大多数人不知道这一奥秘，但部落的巫师或祭师是洞悉这一点的，他们很可能已经掌握从当年的夏至日到下一年的夏至日之间要经历多少天。如果是这样，那么他们实际上已经掌握了一年的时间长度。也许正是由于这一点，他们便掌握了安排部落中各项生产和生活活动的主动权，并为人们所敬服。



图1　巨石阵遗迹

在封建大一统的古代中国，天文学被皇权所主宰。秦汉时期的太史令是一个集天文星占、王室文书起草、策命卿大夫、记载史事与编写史书、主持祭祀和主管皇室图书于一身的高官。他所领导的天文机构中的天文观测人员、历算人员、漏壶或漏刻的管理和报时人员往往多达百人以上，天文和星占活动的所有费用全由皇室的国库开支。这种模式虽然有力地推动了中国古代天文学的发展，但由于一切活动必须顺应皇室的需要，因而也必然带来两

大缺陷：一是造成中国古代天文学与以占卜皇朝兴衰为主要目的星占学密不可分，前者甚至在某种程度上沦为后者的工具；二是导致中国古代天文学的实用性过强，天文观测、历法编制、时间计量等方面很发达，但对天体和宇宙的理性思维方面则很弱。

公元前7世纪至前4世纪上半叶的古希腊，一方面希腊本土诸多岛屿上城邦林立，另一方面希腊人还向海外大移民，他们的足迹遍布小亚西亚沿岸、意大利半岛、西西里岛、西班牙东南岸、尼罗河口和利比亚等地，其中许多移民区也逐渐发展成独立的城邦，这一时期史称希腊城邦时期。在这一时期，各个互相独立的希腊城邦之间在政治上、科学思想上等许多方面形成了一种百花齐放、百家争鸣的局面，当时的希腊学者对科学和哲学问题进行了无拘无束的自由思考，并形成了不同的学派。约公元前530年，毕达哥拉斯(Pythagoras)因反对出生地希腊萨摩斯岛的统治者而流亡到意大利南部的希腊城邦克罗托内，后来在该地创建了一个纪律严明的科学与哲学学院，同时也形成了一个以他为核心的学派。毕达哥拉斯从美学观念出发提出，一切平面图形中最美的图形是圆形、一切立体图形中最美的图形是球形，因此天体和地球都应该是球形，而天体运动的轨道则应该是圆形。这是世界上地球球形观的最早阐述。他还提出了宇宙和谐的观念，并用音乐的和声来类比各颗行星运动的和谐性和规律性。他的这些见解影响深远，开创了古希腊天文学中对天体及其运动进行理性思索并用几何学來阐释天体运动的先河。

毕达哥拉斯所处的希腊城邦时期，处于奴隶制社会，贵族和一些较富有的自由民享用由奴隶创造的物质财富，吃穿不愁，又有闲暇，他们中有些人面对神秘莫测的日月星辰充满了好奇心和求知欲，把探索它的奥秘当做自己最大的乐趣，其中的佼佼者后来就成了像毕达哥拉斯那样的杰出的天文学家。当时，希腊学者们对宇宙奥秘的探索不抱任何功利的目的，他们所研究的问题也毫无功利价值可言。他们进行研究，只是为了满足好奇心，寻找揭示宇宙奥秘的金钥匙。

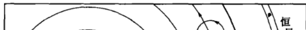
大体上说，发展原始农牧业阶段的文明古国埃及、巴比伦、中国和古印度的天文学可以看成是处于诞生时期的天文学，而封建大一统的中国秦汉时期的天文学和城邦时期的希腊天文学可以看成是诞生时期之后不久的天文学。上面的分析表明，天文学的诞生和初步发展既取决于社会和生产发展的需要，也受到学者们好奇心和求知欲的推动。

三、天文学的革命

(一) 哥白尼的革命

哥白尼(N. Copernicus)的革命是指他创立了日心体系，使天文学和整个自然科学开始摆脱神学羁绊的一场革命。这一体系的诞生经历了漫长的时期。

公元前336年亚历山大大帝(Alexander the Great)登基后,用武力建立起版图很大的亚历山大帝国,公元前323年他去世后该帝国分裂为三个王国,至公元前30年这三个王国中最后一个托勒密王朝埃及被罗马帝国所灭。公元前323年—前30年,史称希腊化时期。这一时期,在亚历山大帝国所分裂的几个王国中科学与文化十分发达,天文学方面也成果卓著,古希腊文明之光甚至一直延续到罗马帝国的前期。公元2世纪,身为罗马帝国公民的托勒玫(Ptolomy)总结和概括了古希腊的天文学成就,写下了一部13卷巨著《天文学大成》。在这部巨著中,他提出了著名的托勒玫地心体系(见图2)。该体系的要点是:① 地球位于宇宙中心静止不动;② 月球和每个行星都在本轮上匀速转动,本轮中心则沿均轮绕地球运转,只有太阳直接在均轮上绕地球转动;③ 水星和金星的本轮中心位于地球与太阳的连线上,这一连线一年中绕地球转一周,火星、木星和土星到它们各自的本轮中心的直线总是与地球-太阳的连线平行,这3颗行星每年绕各自的本轮中心转一周;④ "恒星天"携带所有的恒星每天绕地球自东向西转动一周;⑤ 日、月、行星除上述运动外,还要与恒星天一起,每天绕地球自东向西转一周。



马教皇格里高里九世(Gregory Ⅸ)上台后改变了策略,他用软硬两手来控制人们的思想,一方面下令在罗马成立宗教裁判所,残酷迫害异端思想的传播者,另一方面对古希腊亚里士多德(Aristotle)的哲学和托勒玫的地心说则从排斥改为利用。由于托勒玫地心说主张地球固定不动地处于宇宙中心,这正好可以为教会宣称的"上帝创造天和地,还按照自己的形象创造了人,并安置在位于宇宙中心的地球上管理世界上的万事万物"的宗教神话提供理论依据,于是该学说从被教会排斥变成了教会钦定的"真理"。

欧洲中世纪后期的14—15世纪,按托勒玫地心体系算出的行星位置已和精度日益提高的观测数据越来越不相吻合,有人采用本轮套本轮的图像来修补托勒玫地心体系,但直到整个体系中叠加的本轮加均轮之和达到80个之多,还是无法与观测数据相一致。那时,繁琐的运算使人厌恶,托勒玫地心体系已濒临破产,之所以还能苟延残喘,完全是由于教会支持的缘故。

16世纪初期,深受文艺复兴运动思想影响的波兰天文学家哥白尼发现,托勒玫地心体系中每颗行星都有一日一次、一年一次和相当于岁差(见第四章第四节)的周期运动,如果认为地球本身具有这三种运动,那么该体系中不必要的复杂性全都可以消除。于是他决心摒弃该体系,提出一个新体系。在1543年临终前出版的巨著《天体运行论》中,他提出了日心体系的总图像,指出位于宇宙中心的太阳和最外层的恒星天球固定不动,自太阳向外,各颗行星以不同的周期绕太阳公转,水星80天转一周,金星9个月转一周,地球携月球每年绕太阳公转一周,火星两年转一周,木星12年转一周,土星30年转一周(见图3)。在《天体运行论》中,哥白尼还详细讨论了太阳、月球和诸行星的视运动的计算方法,据此还可以预报日、月和诸行星在天球上的视位置。

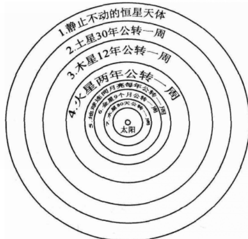


图3　哥白尼日心体系示意图

中世纪的欧洲是基督教教会垄断一切的封建社会。但到了中世纪末期，由于手工业工场的大量出现，新兴的资产阶级诞生了。这一阶级的代表人物从希腊古典文化中找到了反对封建教会文化的武器，发起了文艺复兴运动，其实质是用人文主义反对教会的宗教神学，用提倡个性自由反对宗教桎梏。天文学和整个自然科学曾被教会视为“恭顺的婢女”，这时天文学也起来反叛教会了。《天体运行论》的出版、哥白尼日心说的问世，揭示了地球只是一颗围绕太阳运转的普通行星，根本否定了“地球是上帝安排在宇宙中心”的宗教神话，揭示了宗教统治理论支柱的谬误。《天体运行论》是自然科学的“独立宣言”，是自然科学起来反叛教会的宣战书。自然科学从此开始脱离神学的羁绊，谱写其自身独立发展的历史。从天文学本身的发展而言，哥白尼日心体系以地球运动和地球是一颗普通行星的概念奠定了近代天文学的基石，并为太阳系概念的确立奠定了理论基础，天文学因而率先跨入了近代科学的大门。

从日心体系问世到该体系被确立，又经过艰苦卓绝的斗争，其中最著名的两大事件是布鲁诺(G. Bruno)殉难和伽利略(Galileo)受审。在哥白尼日心体系问世后一个多世纪，意大利哲学家和思想家布鲁诺热情宣传该体系，并指出太阳并不位于宇宙中心，恒星天也并不存在，宇宙是无限的，其中有无数个太阳。这些见解是对日心体系的重要发展。同时他也未给上帝留下任何位置，所以他被宗教裁判所活活烧死。这一事件之后 30 多年，年已古稀的意大利科学家伽利略因著书宣传哥白尼日心体系被宗教裁判所审讯，后被判处终身监禁。然而，尽管教会倒行逆施，但真理是挡不住的，在无数天文观测事实的支持下，哥白尼日心体系最终还是取得了胜利。

（二）康德和拉普拉斯的革命

康德(I. Kant)和拉普拉斯(P. S. Laplace)的革命是指德国哲学家康德和法国科学家拉普拉斯分别在 1755 年和 1796 年提出太阳系起源的星云说，否定了牛顿提出的“上帝做第一次推动”的错误观念，使天文学和整个自然科学从僵死的、形而上学的宇宙观中解放出来。

哥白尼的日心体系是一个几何学的模型，它只能说明太阳系的各颗行星以什么样的次序绕着太阳公转，但却无法解释这些行星为什么会产生这种公转。1687 年，大科学家牛顿(I. Newton)在他出版的《自然哲学的数学原理》中，提出了惯性定律和万有引力定律，他指出行星在椭圆轨道上绕着太阳公转是它沿切线方向的惯性力和受到太阳引力共同作用的结果(见第五章图 5 - 5)，这一见解明确解释了行星为何绕太阳公转。但是牛顿却不能解释行星的这种切线方向的惯性力的来源。于是，他把它归诸于万能的上帝做了第一次推动，由于上帝一开始所做的这种推动力不大也不小，造成行星只能在椭圆轨道

上绕太阳公转。牛顿的这一见解是深深地打上时代烙印的,是17—18 世纪僵化的、形而上学的自然观的反映。在别的学科例如在生物学中,瑞典学者林耐(C. Linnaeus)提出了物种不变论,而在哲学上,有人提出了上帝为了人类需要而创造万物的所谓目的论,也都是这种自然观的反映。这样,从哥白尼发布了自然科学的“独立宣言”开始,自然科学刚刚迈出了第一步,又被重新禁锢在形而上学的囚笼中,重新回归万能的“上帝”主宰一切的宗教意识之中。

在 17—18 世纪形而上学自然观上打开第一个缺口的是康德。1755 年,他匿名出版了《自然通史和天体论》一书,率先提出了太阳系起源的星云假说,该假说认为太阳系的所有天体是从一团主要由固体尘埃微粒构成的稀薄原始星云通过万有引力定律作用而逐渐形成的。而在1796 年,拉普拉斯在他出版的名著《宇宙体系论》一书的附录七中,也提出了太阳系起源的星云假说。拉普拉斯的星云说在细节上更清晰,也更科学,它大体上可用图 4 中的 6 个阶段概括:图中 a 为形成太阳和行星等的自转着的灼热气体星云,起初呈球状,后因不断自转而呈扁球状;b 为星云冷却,并逐渐收缩,收缩过程中自转速度加快;c 和 d 为星云收缩过程中,较外侧部分其离心力和受中心区域的引力相等时,就停在原处成为一个绕中央区域转动的环,这种情况一次次重演,星云外部区域就一再出现绕中央区域转动的环;e 和 f 为星云中央密集部分逐渐收缩为太阳,外部环中的物质越来越向密度较大的地方集中,最后形成行星。由这一图像可以看出,行星在轨道切线方向上的惯性力,是原始星云的自转遗留下来的。

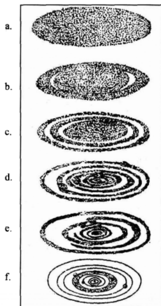


图 4　拉普拉斯星云说示意图

康德和拉普拉斯的星云说内容上有一定的相近之处,现在往往统称为康德-拉普拉斯星云说,它是现代星云说的前身。康德-拉普拉斯星云说的最大功绩是从根本上否定了上帝对行星运动做了第一次推动的说法,明确指出地球和整个太阳系都是在时间的进程中逐渐生成的,因而在当时形而上学的自然观中打开了第一个缺口,它开创了对形而上学的自然观的一场革命。此后,由于其他学科中也对形而上学的自然观展开了批判,导致了认为自然界是在永恒的流动和发展中运动着的辩证的自然观逐渐形成。

四、天文学的两次飞跃和三大分支

哥白尼时代以前的古代天文学围绕着时间与历法工作、测定天体的视位置，以及观测和研究行星的视运动等为主要内容，当时所使用的仪器主要是测定天体视位置的古典仪器。这一阶段的天文工作主要是属于古典天体测量的范畴。在这一阶段对行星视位置测定和行星视运动研究的基础上，哥白尼否定了陈旧不堪的托勒玫地心体系，建立了日心体系。这一体系不是揭示太阳和诸行星在绕地球转动，而是阐述了地球作为一颗普通的行星和其他诸行星一起绕着太阳转动。这一点也许是古典天体测量时期的最大成就。天文望远镜问世以后，人们用它来测定天体的视位置，研究天体在天球上的视运动。发现了光行差、恒星自行、章动和恒星的视差，准确测定了岁差，还使时间和经纬度测量工作的精度大大提高，这些工作属于近代天体测量的范畴。

天文学的第一次飞跃是万有引力定律的发现和天体力学的诞生。1687 年，牛顿发现了万有引力定律(见第五章第一节)，根据这一定律可以解释行星为什么绕着太阳转动，它使哥白尼日心体系这一几何的天文学模型发展为力学的天文学模型。17 世纪下半叶，牛顿和德国的莱布尼兹(G. W. Leibniz)各自独立地创立了微积分，从而为天体力学的诞生提供了数学基础；而到 18 世纪中叶，瑞士的欧拉(L. Euler)和法国的拉格朗日(J. L. Lagrange)创立了分析力学，为天体力学的诞生奠定了力学基础；1799—1825 年，法国的拉普拉斯出版了 5 卷 16 册的奠基之作《天体力学》，正式提出了天体力学这一学科名称，并全面而系统地探讨了天体力学的各有关问题，从此天体力学正式诞生。天体力学的诞生，使天文学从单纯描述天体的几何关系，进入到研究天体之间相互作用的阶段。或者说，从单纯研究天体运动的状况，进入到研究造成这些运动原因的阶段。

天文学的第二次飞跃发生在 19 世纪中叶，天体分光术、天体测光术和天体照相术在这一时期同时问世，反射望远镜也从金属镜面发展到镀银或镀铝的玻璃镜面，这就为研究天体的物理性质、物理状态和化学组成等提供了条件，导致了天体物理学的诞生。这次飞跃导致人类对天体运动的认识，从只能研究天体彼此间的力学运动发展到能够研究天体的各种物理的和化学的运动。

比较、考察天文学的上面两次飞跃，可以看到其中有一个重要的不同。第一次飞跃基于万有引力定律的发现，微积分和分析力学的诞生，不妨认为是理性工具重大发展和突破带来的；而后一次飞跃则主要是探测手段和探测技术的重大进展，或不妨认为是实体工具的突破带来的。这两次飞跃表明，不论是理性工具还是实体工具都是人类认识自然的重要武器，它们在一定条件下，分别在人类认识自然的征途上起了主导作用。

天文学的两次飞跃分别把天文学划分为三大分支——天体测量学、天体力学和天体

物理学，它们既是天文学发展不同阶段的产物，同时每个分支在当今往往又有自已的新的生长点，并相互推动，相互促进。例如，最先发展起来的天体测量学在当今不仅有大量的与实际应用密切相关的工作要做，而且天文地球动力学已成为天文学和地学新的交叉学科，利用许多新技术正在为弄清地球自转速度变化的规律和机制、极移的规律和机制、地球板块运动及其内部推动力等问题作出贡献。在天体力学中，也有与星际航行学之间的边缘学科星际航行动力学、与广义狭义相对论之间的边缘学科相对论天体力学等新的学科。至于蓬勃发展的天体物理学，发展成新的学科就更多了，例如本书第三章中，讨论了射电探测技术、红外探测技术、X 射线探测技术和 γ 射线探测技术，应用这 4 种探测技术已分别形成了射电天体物理学、红外天文学、X 射线天文学和 γ 射线天文学 4 门学科。

五、天体层次

随着人类空间视野的不断扩展，按照空间尺度的规模，我们可以把天体分为行星层次、恒星层次、星系层次和整个宇宙四个自小到大的层次。

（一）行星层次

该层次最典型的代表是地球，它是我们人类的棲息地。在距今短短的 460 多年中，人类空间视野的扩展极其惊人。460 多年前，哥白尼日心体系尚未问世，人们还把自己棲居的地球看成是宇宙的中心，所有的天体都在绕着我们地球转动。哥白尼日心体系正确揭示了地球只是一颗普通的行星，是绕太阳转动的诸行星中的一员。现在我们知道，地球的赤道半径约为 6 378 km，质量约 6×10^{24} kg，离太阳的平均距离约 1.5×10^{8} km 。太阳系中最大的行星是木星，其半径约为地球的 11 倍，质量约为地球的 300 多倍，离太阳的距离约为日地平均距离的 5.2 倍；而最小的行星是水星，其半径只有地球的 38%，质量只有地球的 5.55%，离太阳的平均距离仅为日地平均距离的 38.7%。现已发现围绕别的恒星的行星其质量往往与木星不相上下，这是由于我们探测手段的局限，质量很小的行星还无法探测到。目前我们暂时只能假定围绕别的恒星的行星其大小与质量应与太阳系中的行星不相上下。

（二）恒星层次

该层次的典型代表是太阳，它是离我们最近的一颗恒星，也是我们太阳系的中心天体。太阳在主序星（见第七章第一节）中是一个“中等个儿”，其质量约为地球的 33 万多

倍，半径约为地球的 110 倍，绝大多数恒星的质量是太阳的 0.1～10 倍之间，质量是太阳的近百倍，只有太阳质量的 7%的恒星是极个别的；恒星的尺度相差很大，这是由于恒星的密度相差极其巨大的缘故。太阳最近的恒星，离太阳距离也有 4.3 光年（1 光年 = $9.460\,530\times10^{15}$ m）。作为恒星层次的代表太阳拥有一个行星系统，还有卫星、矮行星和各种太阳系小天体，这在恒星中并不是很有代表性的，因为拥有这样系统的恒星大概只有一小部分，大多数恒星与其他恒星构成双星或聚星。哥白尼的日心体系主张太阳是宇宙的中心，现在我们知道这种观念是错误的，太阳只是银河系中 2 000 亿～3 000 亿颗恒星中的普通一员而已。

（三）星系层次

该层次的典型代表是银河系，它也是我们太阳系所在的星系。银河系中恒星密集部分的银盘直径约为 8.2 万光年，是一个中央厚、边缘薄的较扁平的棒旋星系（见第八章第一节），其中有 2 000 亿～3 000 亿颗恒星。人们往往喜欢自己处于中心地位，在托勒玫地心说主张地球位于宇宙中心和哥白尼日心体系主张太阳位于宇宙中心的见解先后被否定以后，有人主张我们人类所在的太阳系是银河系的中心，或者至少我们的银河系是一个特别大的星系，但这两点先后也都被否定了。

（四）宇宙层次

尺度最大的天体层次是整个宇宙。约在不到 100 年之前，天文学家发现在我们的银河系之外，存在许多形态各异的与银河系尺度不相上下的星系，即河外星系。它们的数量达千亿量级，并且构成了星系团、超星系团等系统，最远的星系离我们已超过 100 亿光年。所有这些星系构成了整个宇宙，也可称之为可观测宇宙，这个宇宙是在 137 亿年前由一次大爆炸形成的，它以光速向四面八方膨胀，它的尺度也应是 137 亿光年，我们目前已经观测到宇宙的边缘。

在短短几百年间，人类的空间视野已从离我们很近处一直扩展到 100 亿光年以外的远处。相对人类渺小的个体而言，宇宙的尺度大得令人炫目。也许有人会对此感到沮丧消沉，但这是完全没有必要的。正如美国著名科普作家阿西莫夫（I. Asimov）在他所著的《洞察宇宙的眼睛》一书中所写的：“当我们想到巨大得不可思议的宇宙，并认识到从伽利略的望远镜开始，我们已从小于一粒微尘的地位上研究出了所有这一切的时候，我们便可以感到无比的骄傲与自傲。人的身体可能是微不足道的，但是他的观察和思维则是巨大的……我们没有任何理由仅仅因为周围一切无思维的东西尺寸巨大而感到羞愧

不安。”

六、当代的天文学

当代的天文学有以下几个重要特点。

（一）全波天文学的时代

人们对天体的认识主要来自于天体发出的电磁波，整个电磁波波段按波长从短到长可分为 γ 射线、X 射线、紫外光、可见光、红外光和射电波 6 个波段（见第三章第一节）。但在 20 世纪初期以前，人们对天体电磁波的探测和研究还只局限于波长区间很窄的可见光和波长很接近可见光的少部分近红外光、近紫外光。20 世纪 30 年代，人们发现除可见光外，天体的射电波也可以穿过地球大气层，从此开创了天体射电波的探测，并诞生了天文学中用天体的射电波来研究天体的新分支学科——射电天文学。在射电天文学诞生前后，人们也开始在地面上某几个小波长区间处探测天体的红外光，从而开创了红外天文学，然而由于红外波段大部分波长处的辐射被地球大气所吸收，地面红外探测的成果很有限。1957 年人造卫星上天之后，人们又逐渐在地球大气层外对天体的 γ 射线波段、X 射线波段、紫外波段和红外波段进行探测，这些波段在地面上是无法探测到的，而在大气层外则可以探测到所有这些辐射。总之在地球大气层外可以探测到整个电磁波段的辐射，因而诞生了全波天文学。近几十年来，全波天文学进展神速，研究成果辉煌。

（二）空间探测的时代

1957 年人造卫星上天以后，一方面人们能用卫星搭载不同的探测设备到大气层外进行各个波段的天文探测，即全波天文学的探测，这些探测对扩展太阳系外遥远天体的认识尤为重要；另一方面，对太阳系内的天体而言，人们还可以用飞船飞向这些天体，就近进行探测，甚至降落在某些天体的表面进行探测，正是由于这样的探测，人们获取太阳、月球、行星、卫星、小行星、彗星等各种太阳系天体的信息大幅增加，短短几十年获取太阳系天体的信息远远超过 1609 年天文望远镜问世后几百年的总和。当今，空间探测技术还在不断发展，它将对太阳系外的遥远天体或太阳系内的天体的认识继续带来长足的进展。

（三）多学科交叉的时代

当代天文学与空间科学、工程技术科学、物理学、化学、数学、地学和生命科学等都存在着交叉。在天文学的探测和研究中体现出当今是多学科交叉的时代。天文学与空间科学、工程技术科学的交叉十分明显，后两者是前者的重要支撑，没有空间探测技术、计算机技术、遥控遥测技术、各种仪器设备研制和光学设备冷加工技术，天文学的探测和研究将寸步难行；天文学与物理学、化学的关系极其密切，在广阔无边的宇宙空间中，有每立方厘米不到一个原子的超高真空，有像中子星内部每立方厘米 10^{12} kg 物质的超高密度，有像脉冲星表面强达 10^{8} T 的超强磁场，有像恒星内部和一些恒星爆发时产生的超过 10^{10} K 的超高温，有像一些星系和星系核抛射物质时所产生接近于光速的超高速度……这些在地面实验室中是根本不可能测到的，对这样条件下的天体的探测和研究，将深刻揭示物质的物理特性和化学特性，是对物理学和化学的巨大挑战；天体力学的研究中有许多与数学密切相关的问题，天体测量学中的新分支天文地球动力学的研究又与地学中的某些分支密切相关，20 世纪 60 年代“阿波罗”登月飞行后新兴的月质学则是天文学与地质学的边缘学科，天文学中对地外生命和地外文明问题的探讨又与生命科学密切相关，这些说明天文学与数学、地学甚至生命科学也存在着交叉。所有这些都表明当今的天文学研究已处在与多学科交叉研究之中。

（四）探测手段与实验手段兼用的时代

在人们只能用可见光观测天体的时代，往往说天文学是一门以观测（观察与测量）为主的学科；后来发展到使用各个电磁波段来探测天体，可以说天文学是一门以探测为主的学科。似乎实验与考察总是与天文学沾不上边，但实际情况并非如此，当代天文学已发展成为探测手段与实验手段兼用的学科。

20 世纪下半叶起，在对太阳系天体研究方面，人们已对它们进行实验和考察。例如，在月球研究方面，1969—1972 年，有 6 艘“阿波罗”飞船飞往月球，登月的宇航员在月面上安装不少仪器，并开展科学实验（见图 5）；宇航员采集月面上的浮土样品（见第四章中图 4 - 30），带回地球进行实验研究；宇航员还驾驶月行车，在其行程范围内，对月面上的各种结构进行广泛的考察。在火星研究方面，1976 年 6 月，降落在火星表面上的登陆器“海盗 1 号”伸出一条土壤取样器长臂（见图 6）取回土样，放进其自动实验室中，进行生物探测实验，结果未发现火星上有生命存在的痕迹；此后又有多个登陆器降落到火星表面，对火星进行多方面的考察。在彗星研究方面，最著名的考察与实验有两件事：一是 2004 年

1月“星尘号”飞船成功地穿过一颗彗星的彗发，将彗星尘粒装进它的俘获器中，并于2006年1月带回地球进行分析研究（见图7）；二是2005年7月“深撞击”飞船向一颗彗星的彗核发射0.35 kg的撞击体，以约10 km/s的速度撞击彗核，并进行了摄像和红外分光探测，以获得彗核物理数据和撞击对彗星轨道改变等数据，这是人类对彗星做的一次开创性的实验研究。此外，发射飞船飞越行星、卫星以及小行星等，拍摄它们的传真照片发回地球的次数众多，不胜枚举，显然它们也是对太阳系天体的近距离的考察。

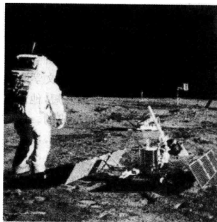


图5　登月的宇航员在月面上开展科学实验

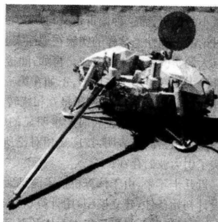


图6　降落在火星表面的“海盗1号”所携带的土壤取样器长臂

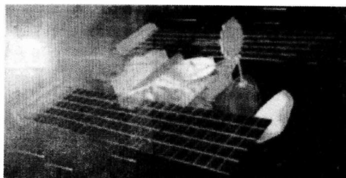


图7　“星尘号”飞船正在俘获彗星尘粒

在研究太阳系外的天体方面，由于它们的距离十分遥远，人们往往不可能像在地面实验室进行物理、化学和生物等实验那样，对研究对象进行系统变革，以获得实验结果。

但是，由于在宇宙空间中，超真空、超高密度、超强磁场、超高温和超高运动速度等各种极端条件远远超过地面实验室，各种可供选择的天体样品的多样化也超过人们想象。所以，人们虽然不能主动地变革研究对象，但却可以精心挑选天体样品，让它们在大自然中自己进行“表演”，按照人们预定的构思，让它们在宇宙空间这个巨大的实验室中完成预定的实验研究。例如，验证广义相对论所预言的光线引力偏折的实验就是一个典型事例。在日全食时拍摄下被月轮挡住的日轮周围的星像，与几个月前同一天区的星像位置进行比较，并进行精心的测量，结果发现日全食时由于太阳的引力作用确实使星光发生了微小的偏折，而这种偏折量又与广义相对论的预言相符，从而从一个方面证明了广义相对论的正确性。这样的实验在地面实验室是根本无法完成的，只有在宇宙空间这个极其巨大的实验室中才能完成。再如，间接证实引力波存在的“实验”也是在宇宙空间这个极其巨大的实验室中完成的，正如在第三章第四节中所介绍的，两位美国天文学家发现脉冲双星 PSR1913＋16 两子星互相绕转周期在以每年 75 μs 的速率逐渐变短，他们认为这是由于两子星互相绕转时产生明显的引力波使双星系统损失能量而造成的。他们所做的多年精密测量表明，按广义相对论所预言的引力波的能量确实与此相符，从而间接证实了引力波的存在。

近几十年来，由于计算机技术的迅猛发展，人们可以根据天文探测获得数据资料，精心设计初始条件，建立模型，用计算机进行模拟计算。特别是使用它来探讨和考察几亿年、几十亿年甚至上百亿年中天体乃至宇宙的起源和演化过程。人们对小到月球起源问题，大到星系的碰撞和演变过程，甚至根据已有资料设置不同初始条件，对宇宙的起源和演化过程等进行模拟计算。计算机的广泛运用，也应看成是天文探测方法和实验方法相结合的一个重要方面。

第一章　天球坐标和天体的视运动

第一节　天球上的基本点和基本圈

人们仰望天穹，它好像硕大无朋的倒置着的半圆球，把河流、山川、城市、乡村统统笼罩在内。晴夜，点点繁星满布在该半圆球的内表面，它们看去似乎都一样远。这个倒置的半圆球便是半个天球。实际上，在肉眼无法看到的地平线之下还有半个天球，两者合起来，构成了所有天体都可以投影在其内表面的整个天球。在这个假想的天球中，不论多么遥远的天体都可以投影在其上，因此它的半径几乎可以看成是无限大的。与这个天球相比，地球可以看做一个小点，因此既可以取观测者位置为天球中心，又可以取地心位置为天球中心。在特殊情况下，甚至可以取太阳的中心位置为天球中心，由于天球半径与日地距离相比，依然大得无可比拟，因此这种取法仍然不会改变恒星、星系等遥远天体在天球上的视位置。

在这个假想的天球上，人们设置了一些重要的基本点和基本圈，其中主要有：

(1) 北天极与南天极。通过天球中心 O 与地球自转轴相平行并一直向外延伸的直线称为天轴，天轴在地球北极方向上与天球相交的点称为北天极(图 1－1 中 P 点)，天轴在地球南极方向与天球相交的点称为南天极(图 1－1 中 P' 点)。

(2) 天赤道。通过天球中心 O 与天轴相垂直的平面向外延伸与天球相交的大圆称为天赤道(图 1－1 中的大圆 $QWQ'E$)。天赤道上任何一点与北天极或南天极在天球上的角距离都等于 90°。天赤道有时简称赤道。

(3) 天顶与天底。取观测者所在地为天球中心 O，将 O 点沿观测者的铅垂线方向分别向上和向下一直延伸必然交天球上两个点，其中头顶方向上的那个点称为天顶(图 1－1 中 Z 点)，脚底方向上那个点称为天底(图 1－1 中 Z' 点)。

(4) 地平圈。过天球中心 O 点作与天顶、天底连线相垂直的平面，该平面与天球相

交的大圆称地平圈(见图 1－1 中圆 *NESW*)。

(5) 天子午圈。天球中心 *O* 点与北天极 *P* 点、天顶 *Z* 点构成的平面与天球相交的大圆(该大圆必然也经过南天极 P'点和天底 Z'点)称为天子午圈,有时简称子午圈(见图 1－1 中圆 $PZP'Z'$)。

(6) 北点与南点。天子午圈与地平圈相交于两点,其中靠近北天极那一点称为北点 *N*,靠近南天极那一点称为南点 *S*(见图 1－1)。若 *O* 点代表观测者,则 *ON* 和 *OS* 恰好是观测者所在地的正北方向和正南方向。

(7) 东点与西点。天赤道与地平圈相交于两点,由天顶 *Z* 点看去,从北点 N 出发,顺时针方向相距 90°的点称为东点 *E*,逆时针方向相距 90°的点称为西点 *W*(见图 1－1)。若 *O* 点代表观测者,则 *OE* 和 *OW* 恰好是观测者所在地的正东方向和正西方向。

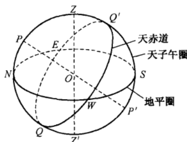


图 1－1 天球上的基本点与基本圈(A)

P—北天极;P'—南天极;圆 $QWQ'E$—天赤道;*Z*—天顶;Z'—天底;圆 *NWSE*—地平圈;
圆 $PZP'Z'$—天子午圈;*N*—北点;*S*—南点;*E*—东点;*W*—西点

(8) 黄道。过天球中心 *O* 点作一个与地球绕太阳公转的轨道面相平行的平面,该平面与天球相交的大圆称为黄道(见图 1－2)。黄道与天赤道,即黄道面与赤道面,有一约等于 23°26′的倾角,它被称为黄赤交角,通常用希腊字母 ε 表示。

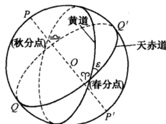


图 1－2 天球上的基本点与基本圈(B)——黄道、春分点♈、秋分点♎

(9) 春分点与秋分点。黄道与天赤道在天球上有两个交点,即春分点(图 1－2 中的♈

点)和秋分点(图 1-2 中的♎点)。从北天极看,太阳在黄道上逆时针方向作周年视运动时,从天赤道南到天赤道北所经过的那个交点称为春分点,而从天赤道北到天赤道南所经过的那个交点称为秋分点,春分点和秋分点分别用符号♈和♎表示。

(10) 周日平行圈。上面提到的天赤道、黄道、地平圈、天子午圈都是天球上各种大圆,因为它们都是通过天球中心的平面与天球相交而产生的圆。只有不通过天球中心的平面与天球相交的圆才是小圆。周日平行圈便是这种小圆。地球在不停地绕其自转轴自西向东自转,每 24 h 自转一周。结果我们看到天球上不同位置处的所有天体都在东升西落,除天赤道(图 1-3 中以 O 点为中心的大圆 QQ')上的天体外,其余天体都沿着不同的小圆(例如图 1-3 中以天轴上 A 点、B 点、C 点为中心的小圆)运转,这些小圆便称为周日平行圈。

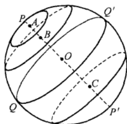


图 1-3　周日平行圈

第二节　两种天球坐标系

根据不同的要求,人们建立了多种天球坐标系,其中最常用的有两种——地平坐标系和赤道坐标系。

一、地平坐标系

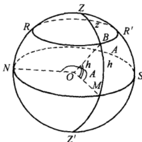


图 1-4　地平坐标系

地平坐标系以地平圈为基本圈,天顶则是它的极。它有两个坐标——方位角 A 和地平高度 h。地平坐标系的基本点(原点)为北点,它也是地平坐标系中方位角 A 的起算点。从天顶看去,方位角 A 从北点沿地平圈顺时针计量,从 0°至 360°。例如,在图 1-4 中,过天体 B 引半个大圆 $ZBMZ'$ 交地平圈于 M,这半个大圆称为过天体 B 的地平经圈,而天体 B 的方位角 A 便是大圆弧 NSM。这是目前普遍采用的方位角的计量方法,过去一度采用的从南点 S 起顺时针计量(0°～360°)的方法,现已告废弃。天体 B 的地平高度 h 从地平圈起算,向天顶方向计量,从 0°至 90°。在图 1-4 中,通过天体 B 作平行于地平圈的小圆 RBR',它被称为地平纬圈,于是大圆弧 MB 或天球中心 O 点对此大圆弧的张角 $\angle MOB$ 便是该天体的地平高度 h。

天体的地平高度 h 有时也采用天顶距 z 代替，两者之间存在着关系式为

$$z = 90^\circ - h \tag{1-1}$$

在图 1-4 中，大圆弧 ZB 即天球中心对该大圆弧的张角$\angle ZOB$ 便是天体 B 的天顶距 z。

天体在天球上做周日视运动时，天体的地平坐标(A,h)在始终不断地变化，因此用地平坐标系来计量天体位置似乎很不方便。但由于在天文大地测量中，地平坐标系一直被广泛地采用，还由于在天文学中，某些大型光学望远镜和许多射电望远镜往往采用地平式装置，它们需要用天体的地平坐标系值来对准天体，再加计算机的广泛使用，现在已经可以十分方便地把任何时刻天体的地平坐标系与下文介绍的天体赤道坐标系进行换算，因此地平坐标系当前在天文学中依然经常采用。

二、赤道坐标系

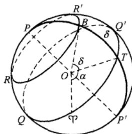


图 1-5 赤道坐标系

赤道坐标系以赤道为基本大圆，北天极 P 点则是这个大圆的极。它有两个坐标——赤经 α 和赤纬 δ。赤道坐标系的基本点为春分点，它也是该坐标系中赤经 α 的起算点。从北天极 P 点看去，赤经 α 沿着赤道反时针方向计量，从 0°至 360°，或从 0 至 24^h。后一种计量赤经的方法很常用，它是基于天球在 24 h 中自转一周，于是取 24 h 相当于 360°(表示为 24h＝360°)，用时间计量上的时(h)、分(m)、秒(s)代替角度计量，两者之间的换算关系是：$1^h=15^\circ$，$1^m=15'$，$1^s=15''$。在图 1-5 中，对天体 B 点而言，引半个大圆 $PBTP'$交赤道上 T 点，这半个大圆称为过天体 B 点的赤经圈，于是天体 B 点的赤经 α 便是从春分点向东(从北天极看去逆时针方向)量度的大圆弧♈ T，它也等于此大圆弧对天球中心 O 点的张角$\angle$♈OT。天体的赤纬 δ 从赤道起算，向北天极 P 点的方向计量为正，向南天极 P'点的方向计量为负。在图 1-5 中，通过天体 B 点作平行于赤道的周日平行圈(也称赤纬圈)RBR'，则大圆弧 BT 与天球中心 O 的张角$\angle BOT$ 便是天体的赤纬 δ。

对恒星或星系而言，它们的赤道坐标相对来说比较固定，许多星表中往往给出了它们的赤经 α 和赤纬 δ 的值，但由于受岁差(见第四章第四节)的影响，春分点♈在天球上的位置每年都有微小的移动，这导致这些天体的赤道坐标每年都有微小变化，这种变化量可以通过计算岁差改正来加以订正。而对于日、月、行星等太阳系天体而言，天文年历中往往刊出它们每年中不同日期的赤经 α 和赤纬 δ。

三、地球上的地理坐标系

天体的赤道坐标系与地球上的地理坐标系相当类似，因此不妨在此把地理坐标系作一介绍，以便读者可以将两者加以比较。

地球不是一个正圆球体，而是一个赤道隆起、两极扁平的椭球体。地理坐标系的两个坐标分别称为纬度 φ 和经度 λ。纬度 φ 的定义见图 1-6。该图中地球自转轴与地球表面相交于 P 点和 P' 点，这两点分别被称之为北极和南极，与 PP' 垂直且通过地心 O 的平面与地球表面的交线便是赤道 QFQ'。任一观测地 M 点被置于地球椭球体的边线上，沿 M 点的铅垂线方向直线 MO'，交地球赤道平面于 O' 点，则 $\angle MO'Q'$ 便是观测地点 M 处的纬度 φ。这表明，地球上任一点的纬度等于它的铅垂线方向相对于赤道平面的倾角。若过 M 点作该点的南北方向线 SN 垂直于铅垂线 ZMO'，再作直线 HM 平行于地球上北极与南极的连线 PP'，则 MH 指向北天极，而且 $\angle NMH$ 等于纬度 φ。它表明，M 点的纬度等于该处看到的北天极的地平高度。纬度 φ 的计量方法是：赤道处 $\varphi=0$，从赤道向北 φ 称为北纬，它逐渐增加，直到北极 P 点处 $\varphi=90°$；从赤道向南，φ 称为南纬，它取负值，直到南极 P' 点，$\varphi=-90°$。

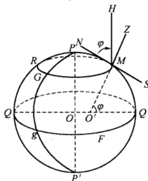


图 1-6　地球上的地理坐标系

地球上的经度 λ 又如何计量呢？首先是起始经线如何确定，1984 年前，将通过格林尼治天文台旧址 G 内的埃里中星仪的经线 PGP' 定为起始经线，也称本初子午线或零子午线；1984 年起，对起始经线重新作了定义，新的定义不再以格林尼治天文台为确定经度的起点，而是以分布全球各地数十家天文台站的观测资料算出赤道上一个假想点作为零子午线的起算点。由于其位置与 1884 年前原先的格林尼治零子午线相当接近，所以图 1-6中依然用过格林尼治天文台的经线大圆弧 PGP' 作为零子午线，该线上的任何点经度均为零。经度在赤道上量度，若零子午线 PGP' 交赤道大圆 QFQ' 于 g 点，而观测地 M

点在赤道大圆 QFQ' 上的投影为 Q' 点，于是大圆弧 gFQ' 便是 M 点的经度。如果 M 点以及它赤道上的投影 Q' 点在 g 点之东（太阳升起方向），则称东经，常用 E 表示，从 0°量起，直至 180°；如果 M 点以及它赤道上的投影 Q' 点在 g 点之西（太阳下落方向），则称西经，常用 W 表示，也从 0°量起，直至 180°。东经 180°与西经 180°的经线是重合的。东经和西经也可以不用 E 和 W 表示，而将东经用正值、西经用负值表示之。

地理坐标用来标志地球上给定点的地理坐标。例如，北京的地理位置是北纬 39°57′，东经 116°19′，就表示为（39°57′N，116°19′E）。

第三节　天体的周日视运动和太阳的周年视运动

一、天球的周日旋转

地球在不停地自西向东自转，但我们在地球上却感觉不到这种自转，所看到的却是整个天球携带日、月、星辰不停地自东向西在做周日旋转，这些天体每天东升西落一次，这便是天体的周日视运动现象。

只有位于天赤道上的天体，其周日视运动的轨迹才是天赤道；天赤道之外的所有天体，其周日视运动的轨迹都是周日平行圈。晴朗无月之夜，北半球的观测者对准北天极长时间曝光，或者南半球的观测者对准南天极长时间曝光，都可以拍摄到如彩图 1 那样的照片，图中亮暗不同的恒星在照片上构成了许多围绕天极的弧线，进而组合成围绕天极的许多同心圆，它们展示的是拱极星区的周日平行圈。若将镜头对准东方或西方的星空长时间曝光，则可拍摄到如彩图 2 的照片，其上恒星的径迹是一条条从东方升起或向西方落下的弧形线。

二、不同纬度处天体的周日视运动

在地球上不同纬度处，天体的周日视运动将呈现出如下三种不同情况。

（一）在北极（地理纬度 $\varphi=90°$）

在北极点的观测者，由于地理纬度 $\varphi=90°$，于是北天极 P 点与观测者的天顶相重合，天赤道与地平圈相重合，所有的天体循反时针方向沿与地平圈相平行的周日平行圈做周日视运动，它们的地平高度始终不变（见图 1－7）。由于太阳在黄道上，它不像恒星那样

赤纬不变，而是存在周年变化。春分到秋分这半年中，太阳的赤纬 $\delta \geqslant 0$，于是这段时间中太阳永不下落，但其地平高度在缓慢变化。秋分到春分这半年中，太阳的赤纬 $\delta \leqslant 0$，于是这半年中太阳永不上升，但其离地平圈的角距离在不断变化。

在南极，地理纬度 $\varphi = -90°$，所出现与上文类似的情况。

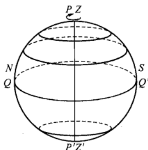


图 1-7　北极点上天体的周日视运动

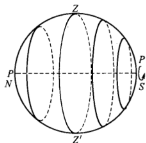


图 1-8　地球赤道上天体的周日视运动

（二）在赤道上（地理纬度 $\varphi = 0°$）

在这种情况下北天极 P 点与北点 N 相重合，南天极 P' 点与南点 S 相重合，天顶 Z 点则在天赤道上。这时所有天体的周日平行圈都垂直于地平圈，它们 12 h 在地平线之上，12 h 在地平线之下。赤纬 $\delta > 0$ 的天体在东北方升起，西北方落下；赤纬 $\delta < 0$ 的天体在东南方升起，西南方落下。（见图 1-8）

（三）一般地区（其地理纬度满足 $0° < \varphi < 90°$，或 $-90° < \varphi < 0°$）

对于 $0° < \varphi < 90°$ 的北半球的观测者而言，北天极 P 点的地平高度 $h = \varphi$，天赤道上的天体 12 h 在地平线之上，12 h 在地平线之下。而赤纬 $\delta > 0°$ 的天体有大半个周日平行圈在地平之上，可观测时间长于 12 h；赤纬 δ 越大的恒星，可观测的时间就越长，$\delta = 90° - \varphi$ 这个圈称恒显圈，该圈内天体的赤纬满足 $\delta > 90° - \varphi$，这个圈内的天体永不落到地平线以下。赤纬 $\delta < 0°$ 的天体只有小半个周日平行圈在地平之上，可观测时间短于 12 h；赤纬值越小的天

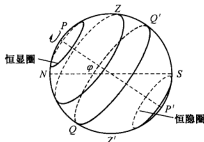


图 1-9　对于 $0° < \varphi < 90°$ 的观测者，天体的周日视运动

体，可观测时间就越短，满足条件 $\delta=\varphi-90^\circ$ 的赤纬圈称恒隐圈；该圈内天体的赤纬 $\delta<\varphi-90^\circ$，这些天体永远不会升到地平线之上(见图 1-9)。

三、太阳的周年视运动

太阳的周年视运动是地球绕太阳公转运动的反映。图 1-10 是一幅日心天球图，图中地球在绕太阳公转，它的自转轴始终在空间取向不变，于是自转轴向外一直延伸交天球上于北天极 P 点和南天极 P' 点，地球赤道平面向外延伸与天球相交形成天赤道，而地球公转的轨道平面向外延伸与天球相交形成黄道。当地球在公转轨道上先后位于 a，b，c，d 四点时，地球上的观测者分别看到太阳位于 A，B，C，D 四点。黄道与天赤道相交于春分点(♈)和秋分点(♎)两点。其中春分点是太阳周年视运动过程中的升交点，即太阳从天赤道南进入天赤道北的交点，这一过程中太阳的赤纬不断增加；秋分点是太阳周年视运动过程中的降交点，即太阳从天赤道北进入天赤道南的交点，这一过程中太阳的赤纬不断减小。

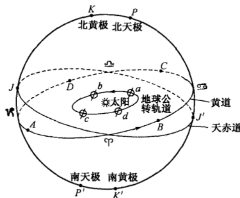


图 1-10 地球绕日公转所造成太阳在天球上的周年视运动

从图 1-10 可以看出，黄道面在天球上的极分别称为北黄极(K 点)和南黄极(K' 点)，黄道上任何一点与北黄极、南黄极相连构成了半个大圆，该点与这两个黄极间的角距离都等于 90°。北黄极与北天极的大圆弧 KP 以及南黄极与南天极的大圆孤 $K'P'$ 都等于黄道面与赤道面之间的交角 ε，即黄赤交角 23°26′。由 K，P，K'，P' 四点构成的大圆与黄道相交于夏至点(♋)和冬至点(♑)，而与天赤道则相交于 J' 和 J 两点。大圆弧♋ J' 和♑ J 都等于黄赤交角 23°26′。也就是说，夏至点是太阳周年视运动过程中走到天球上最北的那一点，它的赤纬 δ 等于 23°26′；而冬至点则是太阳周年视运动过程中走到天球上

最南的那一点，它的赤纬 δ 等于 $-23°26'$。

太阳在天球上做周年视运动时，它依然跟随天球做周日视运动。对于北半球中纬度地区的观测者而言，从图 1-11 可以看出：夏至时太阳沿赤纬等于 $23°26'$ 的周日平行圈绕天极旋转，它从东北方向升起，西北方向落下，大部分运行路径在地平圈之上，此时昼长夜短；冬至时，太阳沿赤纬等于 $-23°26'$ 的周日平行圈绕天极旋转，它从东南方向升起，西南方向落下，小部分运行路径在地平圈之上，此时昼短夜长。只有春分和秋分这两天，太阳从东点 E 升起，西点 W 落下，在地平圈上的运行路径和在地平圈下一样长，此时昼夜等长。

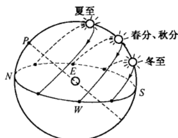
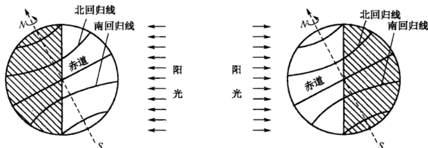


图 1-11 太阳在夏至、冬至、春分和秋分随天球周日视运动的运行路径

北半球与南半球中纬度地区夏季和冬季的形成主要是由于阳光对于地面入射角的大小造成的。这从图 1-12(a)(b)可以看得很清楚。图 1-12(a)表示，冬至前后，阳光直射南回归线（纬度 $\varphi=-23°26'$），南半球的中纬度地区阳光对地面的入射角小，为夏天，而北半球中纬度地区，阳光相当倾斜地射向地面，因而是冬天。图 1-12(b)表示，夏至前后，阳光直射北回归线（纬度 $\varphi=23°26'$），北半球的中纬度地区为夏天，而南半球的中纬度地区则因阳光斜射地面而成为冬天。然而，北半球一年中最冷和最热的时候并不在冬至和夏至，而是要延后一个月左右时间，这是由于那里的地面和低层大气需要有一个逐渐散热降温或积蓄热量的滞后过程。由于类似的原因，南半球最热和最冷的时候也不在冬至和夏至，也会延后一个月左右时间。



(a) 北半球为冬季日照，南半球为夏季日照　(b) 北半球为夏季日照，南半球为冬季日照

图 1-12 冬季日照和夏季日照

中国黄河以北许多地方广泛流传的“九九歌”中说“三九、四九冰上走”，认为三九、四九连河流都冰封了，上面可以走人，是一年中最寒冷的日子。“九九歌”中的一九是从冬至(12 月 21 日或 22 日)这天起算的，每过 9 天为一个九。三九、四九大约在冬至之后一个月左右。因此，上文所说的最冷的日子要比冬至晚一个月左右，与“九九歌”中的说法是互相吻合的。

不少人有一种误解，认为最冷的时候，就是地球离太阳最远的时候。对于北半球的居民来说，情况恰恰相反。北半球处于寒冬季节时，地球绕太阳恰好处于近日点(地球约在 1 月 4 日过近日点)附近(见图 1-13)。地球虽然在一个椭圆轨道上绕太阳转动，但这个椭圆的偏心率只有 0.016 7，因而这个椭圆轨道与圆轨道非常接近，地球处于近日点和远日点时离太阳的距离变化并不明显，对地面温度的变化影响甚小。而正如前文中所指出的那样，地球上的季节变化乃是由于太阳直射地面还是斜射地面而引起的。

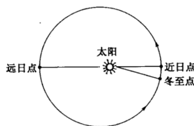


图 1-13 地球绕日公转时过近日点的日期只比冬至时晚十多天

第四节 太阳的上中天和下中天

天轴 PP' 把子午圈分成两半，即包含天顶(Z 点)在内的半个大圆 PZP' 和包含天底(Z'点)在内的半个大圆 $P'Z'P$。太阳做周日视运动时经过包含天顶的那半个子午圈 PZP' 称为太阳上中天，这是太阳每天东升西落过程中所能达到的天球上的最高位置；太阳做周日视运动时经过包含天底的那半个子午圈 $P'Z'P$ 称为太阳下中天，这是太阳每天东升西落过程中所能达到的天球上的最低位置。

一、白夜与黑昼

白夜是指夏至前后，夜晚太阳到达下中天位置时，它依然留在地平线之上，整个夜晚如同白昼，故称白夜。黑昼则是指冬至前后，白天太阳甚至到达上中天位置，它依然留在地平线以下，整个白天天空漆黑一片，故称黑昼。

在北半球，出现白夜和黑昼现象的纬度至少是 $\varphi \geqslant 66°34'$，即在北极圈内。下面用图 1-14 来说明为何在北极圈内会出现白夜和黑昼。该图中 O 点代表天球的中心，P 点和 P' 点表示北天极和南天极的位置，Z 点和 Z' 点分别表示天顶和天底的位置，N 和 S 点分

别表示北点和南点，大圆 $NPZSP'Z'$ 代表天子午圈，$Q'Q$ 表示天赤道在子午面上的投影。夏至日太阳上中天时，它到达子午圈上点 F，$\angle FOQ'$ 是夏至太阳上中天时的赤纬，它等于 $23°26'$。而 $\angle POF = 90° - \delta = 66°34'$，此值正好与 φ 值相等。太阳下中天时，上中天在 F 点的太阳，在下中天时到达北点 N，也就是说子夜时下中天的太阳依然在地平线处照耀，因而形成白夜。当纬度 $\varphi > 66°34'$，而且越来越大时，白夜出现的天数也越来越多。直到 $\varphi = 90°$ 即观测者位于北极时，春分至秋分这半年中，太阳一直不落到地平线之下，而是在地平线上不同高度处绕北天极转动。

下面再来看在北半球纬度 $\varphi \geqslant 66°34'$ 处，黑昼是如何形成的。依然参看图 1－14，冬至时太阳的赤纬 $\delta = -23°26'$，下中天时太阳位于G点，即 $\angle QOG = 23°26'$。此时 $\angle GOP' = 90° - 23°26' = 66°34'$，而 $\angle P'OS = \varphi$，也等于 $66°34'$，于是原先下中天时位于 G 处的太阳，上中天时到了南点S上，也就是说白天时太阳也不能升到地平线之上，于是出现了黑昼。当纬度 $\varphi \geqslant 66°34'$，而且当 φ 越来越大时，那里冬至时将出现更多天黑昼，直到 $\varphi = 90°$，即观测者位于北极时，从秋分到春分这半年中，太阳一直无法升到地平线之上，这半年中北极地区完全不见阳光。

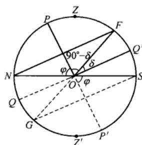


图 1－14　白夜和黑昼的形成

地球上的南半球，出现白夜和黑昼的纬度 φ 至少在 $-66°34'$ 处，而在南半球的纬度更高处，白夜和黑昼的天数更多，直到纬度 $\varphi = -90°$，即地球上南极点时，出现秋分到春分有半年是白夜，而春分到秋分有半年是黑昼。

二、一个计算实例

在日常生活中，人们往往会涉及到太阳上中天的讨论与计算，特别是冬季人们能否充分享受阳光就与此密切相关。下面仅以购房与天文学的关系来举例说明之。地价昂贵，开发商总是尽可能利用有限的土地面积多盖楼盘。这造成不少楼盘的较低层次在冬季往往阳光不足，这是购房者必须认真加以考虑的问题。

南京有一对夫妇看中了该市某小区一幢小高层楼二楼中部一套房，小区环境优美，交通方便，他们看中的这套房朝向正南方，面积适中，每平方米的单价又比较低，唯一的缺陷是正南不远处正好有一幢东西方向上相当宽的小高层楼挡了阳光，冬季阳光明显不足。经实地测量，南边那幢楼二楼（与他们拟购的那套房处于同一水平面上）以上的高度和到他们那套房的南北方向楼距间的比例为 1 比 1.1，请粗略计算一下，他们这套房从深

秋到冬天会有多少天完全照不到太阳，以便让他们决定是否购买。

太阳上中天是一天中太阳在正南方升到天球上最高位置的时刻，于是对此问题可按如下步骤解答：

(1) 根据图 1－15，计算南边那幢楼楼顶的仰角 α，即 $\angle ABC$。

如图 1－15 所示，南边那幢楼二楼以上高度与水平方向上的楼距之比为 1 比 1.1，即 $AC/AB = 1/1.1$，于是立即可以求得角 α，即 $\angle ABC$，$\tan\alpha = 1/1.1 = 0.9091$，于是可得 $\alpha = 42°17'$。

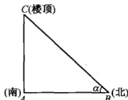


图 1－15　求南边那幢楼楼顶的仰角

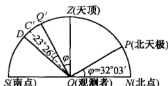


图 1－16　计算这套房完全照不到太阳的天数辅助图

(2) 图 1－16 绘出天子午圈地平线以上的部分，根据此图可求得冬至时太阳上中天时的地平高度，即 $\angle SOD$：在南京，北天极高度 = 纬度 $\varphi = 32°03'$。Q' 为天赤道与天子午圈的交点，在子午面内，$\angle ZOQ' = \angle NOP = 32°03'$。若 D 点为冬至时太阳上中天的位置，则 $\angle Q'OD = 23°26'$，于是 $\angle SOD = 90° - 23°26' - 32°03' = 34°31'$。

(3) 求这套房完全照不到太阳的天数：图 1－15 中的 B 点相当于图 1－16 中的 O 点；图 1－15 中 A 点再向南延伸必然交于图 1－16 中所示的天球上的 S 点；图 1－15 中 C 点沿 BC 方向延伸交于图 1－16 所示天子午圈上的 C' 点，即 $\angle SOC' = \alpha$。于是，太阳上中天因季节变化处于图 1－16 所示的天子午圈上 $\overset{\frown}{DC'}$ 期间便是这套房完全照不到太阳的天数。$\overset{\frown}{DC'} = \angle SOC' - \angle SOD = 42°17' - 34°31' = 7°46'$，也就是说冬至前与冬至后太阳各在天子午圈 $7°46'$ 的范围内，这套房完全照不到阳光。近似认为从秋分到次年春分约 180 天中，太阳上中天时每天的地平高度是均匀变化的，其变化量为 $\overset{\frown}{Q'D}$ 加上 $\overset{\frown}{DQ'}$，即 2 倍的黄赤交角，而太阳处于 $\overset{\frown}{C'D}$ 加上 $\overset{\frown}{DC'}$ 期间是那套房始终照不到太阳的日子。若 x 为该套房始终照不到太阳的天数，于是有 $x/180$ 天 $= 7°46'/23°26'$，由此可以算出 x 等于 59.7 天，也就是说在冬至前和冬至后这套房各有近一个月时间照不到太阳。

第二章　时间和历法

第一节　真太阳时、平太阳时和恒星时

确定一日中的时刻和对一日以内时间间隔的量度，是天文学中时间计量工作的主要课题。远古的人们日出而作，日落而息，他们看到太阳从东方升起，西方落下，而第二天和第三天又一再继续这种周而复始的循环，于是他们逐渐形成了"日"的概念。后来，人们才弄清楚，一"日"是地球自转一周造成的。但地球自转一周还因为它相对于太阳还是相对于恒星而产生了"太阳时"和"恒星时"两种不同的时间。

一、真太阳时和平太阳时

太阳时是以太阳为参照物而形成的时间，其中又分真太阳时与平太阳时两种。

真太阳是指人们日常生活中所见的真实的太阳。定义真太阳的视圆面中心从下中天到下一次的下中天所经历的时间间隔为 1 个真太阳日，之所以采用真太阳下中天作为 1 个真太阳日的开始，乃是为了更符合人们日常生活的习惯。1 个真太阳日可以分为 24 等份，其中 1/24 真太阳日为 1 个真太阳小时，1/60 真太阳小时为真太阳分，1/60 真太阳分为真太阳秒。这样一套以真太阳视圆面中心的位置变化建立起来的计量时间的系统，称为真太阳时。

古代使用的计量时间的系统便是真太阳时，而日晷正是测量正太阳时的重要仪器。中国古代最常用的一种日晷称为赤道式日晷(见图 2 - 1)，它有一根细竿垂直穿过一个圆盘盘面的中心，细竿的顶端指向北天极，而圆盘的盘面与天赤道所在平面相吻合，盘面正反两面均匀地刻着时间标记的刻度。白天，在阳光的照射下(春分至秋分阳光照射圆盘

的上表面，秋分至春分阳光照射圆盘的下表面），根据细竿的影子在圆盘表面的投影，可以方便地读出时间。这种时间便是真太阳时。

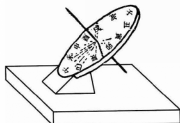


图 2-1　赤道式日晷示意图，用它可以读出真太阳时

什么是平太阳时呢？这要从真太阳时的不均匀性说起。地球在椭圆轨道上绕太阳运动，太阳位于该椭圆的一个焦点上。根据行星运动第二定律，地球到太阳的连线在相等时间内扫过的面积相等（见图 2-2），因此，地球在近日点（约在公历 1 月 4 日左右）附近在轨道上必然走得较快，而在半年后地球到远日点附近必然走得较慢。这造成太阳在黄道上周年视运动的速度是不断变化的。再者，由于太阳是在黄道上做周年视运动，即使这种视运动是均匀的，它投影到天赤道上也会产生不均匀性。以上两种因素都造成了真太阳时是不均匀的，它就像一个蹩脚的时钟，走得时快时慢，一年当中的最大偏差甚至会达到 10 多分钟。显然，这样的一种时间，人们是无法接受的。

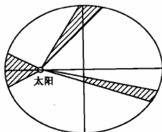


图 2-2　根据行星运动第二定律，地球在椭圆轨道上绕太阳公转时，日地连线在相等时间内扫过相等的面积（图中用 3 个等面积的阴影区表示）

19 世纪末，美国著名天文学家纽康（S. Newcomb）引入了平太阳的概念。他假设有一个平太阳 M 在天赤道上做匀速周年视运动，其运行速度与真太阳在黄道上周年视运动的平均速度一致，沿赤道运行一周的时间正好等于一回归年。他还给出了一个很长时期中平太阳赤经值的准确表达式。以这样一个平太阳的运行定义的时间便是平太阳时。与真太阳时一样，平太阳时也以平太阳的下中天起算。平太阳时的时间计量系统中同样

存在平太阳日、平太阳小时、平太阳分和平太阳秒，它们的定义与真太阳时的时间计量系统中十分类似。

平太阳是一个假想天体，在天空中并非真实存在，因此无法对它进行实际的观测和测量。只有通过对恒星的观测，获得下文中所介绍的恒星时，再经过一定步骤的理论换算，才能求得平太阳时。为简单起见，平太阳时往往又称平时。

二、恒星时

恒星时与太阳时的区别可以从图 2-3 中看出。图中 S 点为太阳的位置，地球在绕太阳的运行轨道上公转，E 点为地球的初始位置，由 E 点向 A 点方向看去，正好可以看到 S。而由 E 点向正好与 EA 相差 180°的 ED 方向看去，则看到某颗确定的恒星。图中 E' 点为 1 天后地球的位置，由它向平行于 ED 的 $E'D'$ 方向望去，可以看到相同的恒星，但向与 EA 平行的 $E'A'$ 方向望去，并不能看到太阳，而必须等地球再转过 $\angle A'E'S$（约 1°左右），才能在 $E'S$ 方向上看到太阳，也就是说，太阳时要比恒星时稍长。

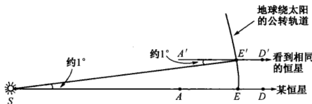


图 2-3　恒星时与太阳时的区别

由于地球既在不断自转，又在绕太阳公转。一回归年 365.242 2 个平太阳日中，地球相对于太阳自转了 365.242 2 周，同时又绕太阳公转了 1 周，但相对于某个固定方向的恒星而言，地球却自转了 366.242 2 周。因此

$$365.2422\ \text{平太阳日} = 366.2422\ \text{恒星日} \tag{2-1}$$

或者

$$1\ \text{平太阳日} = (1 + 1/365.2422)\ \text{恒星日} \tag{2-2}$$

正是由于这一原因，我们每天可以看到同一恒星要比太阳早升起 3 分 56 秒，每经过 1 个月，同一恒星要早升起约 2 h。因而不同季节夜晚的同一时间，人们看到的星空是完全不同的。

本书作者之一出生在江南水乡的农家。夏日夜晚，在天空中，满天繁星在闪烁，在田

野上，无数萤火虫在飞舞，尾部也在一闪一闪地发光。孩提时代，听大人讲天空中牛郎、织女等故事，认天上的几颗亮星，以及到处捉萤火虫，是我们夜晚的兴趣所在。当时的农家没有钟表，但许多农民都能根据不同季节天空中的几颗亮星的方位，估计出夜晚的时间。而到了少年时代，我已经认识到不同季节，夜晚的星空完全是不同的(见图 2 - 4 和图 2 - 5)。后来考入南京大学天文系之后，才知道这正是由于恒星时与太阳时的长度略有不同，日积月累慢慢造成的。

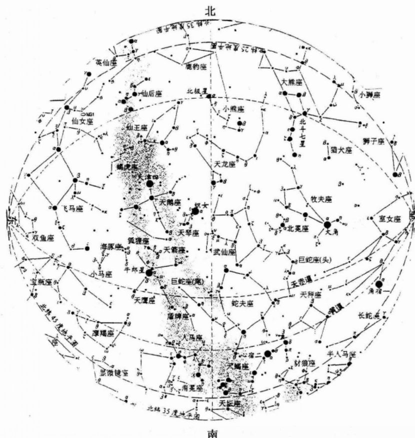


图 2 - 4 夏季星空[本图是北半球中纬度地区(纬度 35°左右)8 月中旬晚 8 时左右的星空，北斗七星斗柄指向南方，牛郎星与织女星遥隔银河相望]

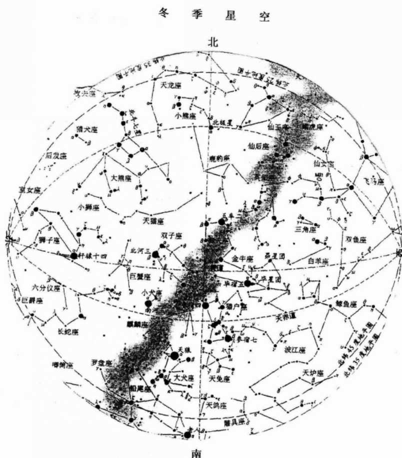


图 2-5　冬季星空(与上图同一地区 2 月中旬晚 8 时左右的星空,北斗七星斗柄指向北方,猎户四边形十分醒目,"猎户"腰间三星直指东南方全天最亮恒星天狼星)

在本节末尾,介绍一种天文学家们获得恒星时的常用测量方法,但不做推导。如果在任一观测地点,某颗上中天的恒星的赤经(见第一章第二节)为 $\alpha_{上}$,则该观测地点的恒星时 s 为

$$s = \alpha_{上} \tag{2-3}$$

(2-3)式表明,恒星时可以通过观测任何一颗上中天恒星的赤经求得。

第二节 世界时、区时与国际日期变更线

一、世界时

上节中所建立的平太阳时，是依据平太阳在观测地点下中天的时刻开始计量的，这样的平太阳时实际上应称为地方平太阳时。在地球上不同经度的两地，即使彼此相距不远，例如南京和合肥，由于它们的天子午圈不同，平太阳过两地的天子午圈的时刻也不同，因此这两地的平太阳时是不同的。

19 世纪，由于航海事业蓬勃发展的需要，许多国家相继建立了天文台，进行专门的天文观测来测定时间。为了协调时间的计量和确定地理经度，1884 年在美国华盛顿举行的国际子午线会议上决定，采用当时英国格林尼治天文台内著名的埃里中星仪所在的子午线作为时间和经度计量的标准子午线，那里的地理经度取为 0°，这条子午线称为零子午线或本初子午线。1928 年国际天文学联合会决定，将由位于格林尼治天文台内本初子午线上的平太阳时称为世界时，它也就是通常所说的格林尼治平太阳时。

二、区时

鉴于一个国家内各地分别使用地方平太阳时十分不便，19 世纪中后期欧美一些国家已开始采用全国统一的时间，如英国采用格林尼治天文台的地方平时、法国采用巴黎的地方平时、美国采用华盛顿的地方平时等。这种时间在自己一个国家内使用，尚可应付。但随着国际交往的日益频繁，这种未经协调的地方平时，依然给人们带来了许多不便。于是，19 世纪 70 年代后期，加拿大铁路工程师弗莱明(S. Fleming)建议，全世界按统一的标准划分时区，实行分区计时。1884 年在华盛顿召开的国际子午线会议上，弗莱明提出的方案获得通过，区时制正式诞生。区时制的划分方法是：以英国格林尼治天文台的本初子午线即 0°经线之东与之西各 7.5°的区域划为 0 时区；从 0 时区东边界向东，每隔经度 15°划一个时区，共划 12 个时区，分别称为东 1 时区、东 2 时区……直至东 12 时区；从 0 时区西边界向西，同样每隔经度 15°划一个时区，也划 12 个时区，分别称为西 1 时区、西 2 时区……直至西 12 时区；东 12 时区和西 12 时区相重合，因而全世界共划有 24 个时区(见图 2-6)。

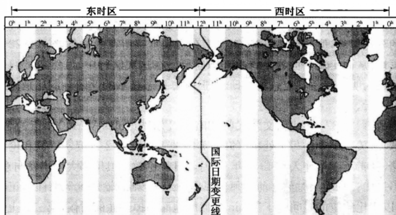


图 2-6　全世界的理论时区图(左侧为东 1 至东 12 时区,右侧为西 1 至西 12 时区,中间东 12 和西 12 的重合时区上有一条国际日期变更线)

需要指出的是,图 2-6 所绘的世界时区只是严格按照经度划分的理论时区图。由于地理、政治、经济等因素,实际实行的时区图与该图还有不小的差异。

区时制问世后,凡采用正常的区时制的国家所用的标准时间其分和秒的数字都是相同的,而小时数只相差整数。世界上也有少数国家,如伊朗、阿富汗、印度、缅甸等国,采用与区时相差半小时的时间为统一标准,它们属于半时区的区时制国家。此外,世界上还有很少几个国家如圭亚那、利比利亚等国,采用完全独立的地方时为全国的统一时间,它们那里所用的时间时、分、秒都与别的国家不同。

我国从西到东横跨东 5 至东 9 共 5 个时区,但全国统一采用的是东 8 时区的区时,它被称为北京时间。必须指出,北京时间并不是北京(位于东经 116°19′的经线上)的地方平太阳时,而是东 8 时区的中线即东经 120°处的地方平太阳时。北京时间比格林尼治平太阳时(即世界时)要早 8 小时,即

$$\text{北京时间} = \text{世界时} + 8\ \text{小时} \qquad (2-4)$$

三、国际日期变更线

在上面的图 2-6 中,可以看到在互相重叠的东 12 时区和西 12 时区处,存在着一条被称为“国际日期变更线”(又称“日界线”)的折线。它有什么用途呢?在回答这个问题之前不妨先介绍两则小故事。

第一则故事与葡萄牙航海家麦哲伦(F. de Magalhães)的首次环球航行有关。1519

年9月20日，麦哲伦率领了一支由265人、5艘船组成的船队离开西班牙圣卢卡尔港，穿越大西洋向西远航，经历了近3年的环球航行，尽管麦哲伦本人在1521年4月丧生于菲律宾群岛的马克坦岛，但最后还是有18位幸存者乘唯一留存的一条船于1522年9月6日回到出发地，从而实现了世界上首次环球航行。在这次航行中，虽然船员们严格地按照日出日落或天明天暗逐日记载航海日志，但航海日志显示的返回日期还是比岸上显示的日期少了一天。

第二则故事与1873年法国文学大师儒略·凡尔纳(Jules Verne)出版的名著《八十天环游地球》有关。书中描写了处事严谨的英国绅士福克以2万英镑巨款和伦敦某俱乐部的人打赌，他带了一个仆人在1872年10月2日从伦敦该俱乐部大厅出发向东旅行，80天后的12月21日傍晚某时刻之前必须返回出发地，否则就输掉这笔赌注。正当他们历尽艰险，自以为比约定的时间晚了5 min返回原地而输掉赌注的时候，第二天上午他的仆人告诉他，他们把日期多算了一天，当天才是12月21日，于是福克和仆人赴到约定地点，并赢得了赌注。

以上两则故事中的主人公为何都将日期搞错了一天呢？原来前一则故事中，麦哲伦环球航行的船队是在向西航行，他们在追逐太阳，途中所经历的每一天都比留在出发地的居民稍长，结果环球一周后他们看到的太阳少东升西落了一次，于是他们的航海日志显示的返回日期就比原地显示的日期少了一天。而在后一则故事中，福克和他的仆人是在向东旅行，途中所经历的每一天都比出发地的一天短，结果环球旅行一周后就看到太阳多东升西落了一次，于是他们记录的日期就比出发地多了一天。为了避免出现这种错误，全球实行区时制后，地球上必须有一条经线是每天日期的开始处，于是就产生了国际日期变更线。

国际日期变更线选在既是东经180°经线又是西经180°经线相重叠处，那里既是东12时区的中心线又是西12时区的中心线。国际上规定，这条线的西侧是新一天的开始。国际日期变更线所处的东经180°暨西经180°经线基本上都在海上，穿过的陆地很少。为了尽量不让同一国家的人处于不同的日期，这条线又不是完全沿东经180°暨西经180°的直线，而是一条折线。这条折线在北极圈处不是穿过俄罗斯的西伯利亚东北部，而是向东偏折穿过白令海峡，再向南行进时为避免穿过美国的阿留申群岛，它又折向西绕过该群岛西侧再向东南方向海上行进。到了南纬5°～20°处，为避免横穿斐济群岛等岛屿，它又一次向东偏折，从斐济与萨摩亚之间的海上向南穿行(见图2-7)。

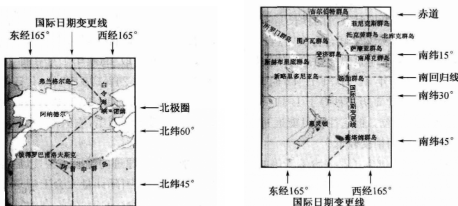


图 2－7　国际日期变更线中的两段折线

在国际日期变更线的两侧，在十分特殊的情况下，有可能出现弟弟比哥哥早一年出生的怪事。假设有一位孕妇在预产期前一周从斐济首都苏瓦登上飞机向西飞往秘鲁首都利马，但因旅途颠簸她一上飞机就提前分娩，顺产生下双胞胎中的哥哥，而这一天正好是斐济的区时 2010 年 1 月 1 日上午 9 时。然而产妇腹中未出生的那个婴儿不巧遭遇难产，眼看母子生命危险。这时机长果断地与前方的萨摩亚首都阿皮亚市机场申请紧急着陆，并要求该市产科医院派救护车到机场接孕妇赴医院抢救，对方同意了这一安排。后来，经阿皮亚市产科医院抢救，双胞胎中的弟弟在该医院降生，这时的时间是萨摩亚的区时 2009 年 12 月 31 日上午 11 时 50 分。于是哥哥在 2010 年出生而弟弟在 2009 年出生，出现了弟弟比哥哥早一年出生的“怪事”。当然，弟弟肯定不可能比哥哥早出生，在这个例子中只是兄弟俩的出生日期用的是国际日期变更线两侧两个国家的不同区时吧了。目前国际上规定，按照全球实行的区时制，自东向西穿过这条线，日期就得加上一天，而自西向东穿过这条线，日期就得减去一天。

第三节　原子时与协调世界时

一、原子时的诞生

上面两节中涉及的真太阳时、平太阳时、恒星时和世界时（格林尼治平太阳时）都是以地球自转为基础的时间计量系统，也被称为世界时系统。由于地球自转存在着长期变

慢(平均每过 100 年,日的长度约增加 0.001 6 s),以及存在季节变化和不规则变化,这种不均匀性造成了世界时系统的秒长是不固定的,它不符合精确的时间计量工作的要求。

1952 年国际天文学联合会决定,自 1960 年起采用历书时代替世界时作为基本的时间计量系统。历书时是建立在地球绕太阳公转的基础上的,它取 1900 年 1 月 0 日 12 时正(相当于 1899 年 12 月 31 日 12 时正)回归年长度为 365.242 198 78 日,1 日等于 8.64×10^4 s,因此 1 历书秒等于 1/31 556 925.974 7 回归年。历书时秒长固定,是一种均匀的时间计量系统。但它往往只能通过对月亮的长期观测才能测出,它只能达到 0.1 s 的实测精度,因而精度较低。

1955 年英国制成了第一台基于铯的基态超精细能级跃迁原理的铯原子钟,以后原子钟的精确度、稳定度不断提高,终于在 1967 年召开的第 13 届国际计量大会上规定了新的秒的定义,由它确定的时间计量系统称为原子时。原子时秒长的定义是,在地球海平面上,铯原子基态的两个超精细能级在零磁场中跃迁辐射振荡 9 192 631 770 周所持续的时间。1967 年这一“秒”的长度代替了历书时中“秒”的长度,它被称为原子秒,成为国际单位制的时间单位。原子时的起算点是世界时 1958 年 1 月 1 日 0 时,即认为在这一瞬间原子时与世界时重合,但后来发现这一瞬间两者并非真正重合,而是相差了 3.9×10^{-3} s,这一微小差异已作为历史事实被保留了下来。原子时问世后,时间计量标准由天文学的宏观领域过渡到物理学的微观领域。

二、协调世界时

原子时的出现使计时工作达到了前所未有的高精度,它能提供精确而均匀的时间间隔,满足精密校频等物理学测量的要求。由于地球自转存在着长期变慢,世界时也必然存在着长期变慢。于是,精确而均匀的原子时与存在长期变慢的世界时并不能简单地对应起来。然而另一方面,世界时又是不可缺少的,因为大地测量、天文导航和宇宙飞行器的跟踪、定位等,都需要知道以地球自转角度为依据的世界时时刻。为了协调原子时和世界时这两种时间,在 1960 年国际无线电咨询委员会和 1961 国际天文学联合会的会议上,决定建立一种介于原子时与世界时之间的时间尺度,这种时间尺度是世界时时刻与原子时秒长之间折中协调的产物,所以称为协调世界时。

1960—1971 年,作为一个过渡时期,曾建立过一种秒长稍有变化的协调世界时。到了 1972 年 1 月 1 日以后,开始采用一种秒长恒定的新的协调世界时系统。该系统中的秒长严格等于原子时的秒长,但可以增加 1 s 或去掉 1 s,增加 1 s 叫做正跳秒(又称正闰秒),去掉 1 s 叫做负跳秒(又称负闰秒),以便使协调世界时时刻同世界时之差保持在 0.9 s或−0.9 s之内。跳秒调整一般在 6 月 30 日或 12 月 31 日的最后 1 min 实施。由于

地球自转的长期变慢,自协调世界时实行以来,正跳秒几乎每年都有一次,但负跳秒则从未出现过。

协调世界时虽然不是严格均匀的时间计量系统,但它与原子时有确定的换算关系,所发生的跳秒又被国际时间局记录在案,所以它的时刻仍然能被纳入均匀的时间计量的范畴。当今,协调世界时已在人们生活中得到广泛应用,现在钟表所指示的时刻正是协调世界时。另一方面,根据逐年记录在案的跳秒,还能从协调世界时计算出满足天文观测需要的世界时和均匀计时需要的原子时。因此,协调世界时的确是一种兼顾多方面需要的时间计量系统。

第四节　历　　法

自古以来,人们观测太阳、月亮在天球上的视运动规律,形成了以昼夜循环周期的日、月亮圆缺周期的月以及寒来暑往周期的年来进行比一日长得多的时间的计量。日,古人使用的是真太阳日,后来才逐渐使用更加均匀的平太阳日,而月和年,则分别使用朔望月和回归年。但由于朔望月和回归年都不是日的整数倍,而且朔望月和回归年之间又不能通约,因此就需要制定合理的原则和方法来协调回归年、朔望月和日之间的安排,于是便产生了历法。

世界各国的历法可归纳为阳历、阴历和阴阳合历三大类。

一、阳历

阳历又称太阳历,它的周期是回归年长度,即一回归年中包含多少个真太阳日或平太阳日。地球绕太阳公转,造成太阳在天球上做周年视运动。1 回归年是指太阳在天球上沿黄道做周年视运动时连续两次通过春分点的时间间隔;中国古代则将 1 回归年定义为太阳沿黄道做周年视运动时连续两次通过冬至点的时间间隔。这两个定义实际上是完全一致的。

阳历只考虑 1 回归年中有多少日,而无需考虑朔望月与回归年之间的关系问题。现行公历是阳历的典型代表。现行公历又称格里历,它是由罗马教皇格里高里十三世(Gregory XIII)在 1582 年颁行的,它的诞生有一个漫长的过程。

公元前 59 年,古罗马的最高统治者儒略·恺撒(Julius Caesar)邀请古希腊亚历山大学派的天文学家索西泽尼(Sosigene)帮他改革当时已十分混乱的历法。到了公元前 46 年,儒略·恺撒颁布了改历的命令,他将冬至以后 10 天定为一年的岁首,每年 12 个月,大小月相间,单数月为大月 31 天,双数月为小月,除 2 月之外均为 30 天,但 2 月只有 29

天，然后再每间空 3 年置闰一次，闰年在原先只有 29 天的 2 月增加一天，为 30 天。这样 1 年的平均长度为 365.25 日。但他改历时把他的出生月 7 月改用他的名字 Julius（音译为儒略）来命名。儒略·恺撒在改历一年后遇刺身亡，僧侣们在执行这一历法时，错把“每间空 3 年置闰 1 次”的规则误解为“每 3 年置闰 1 次”，于是从公元前 42 年到公元前 9 年，共比规定多置了 3 个闰年。此事被当时尊称为奥古斯都（Augustus，意为神圣）的罗马帝国皇帝发现了，他下令从公元前 8 年到公元 4 年中不置闰，以抵消以前多设的 3 次闰年。从公元 8 年起，又恢复儒略·恺撒定下的每 4 年设置 1 个闰年的置闰法则。这些做法显然是正确的，但他又步儒略·恺撒的后尘，把自己出生的 8 月改用他的称号 Augustus 命名，并将这个月改为大月，然后把 9 月和 11 月改为小月，而 10 月和 12 月改为大月。这样一改就增加了 1 天，于是他再从 2 月中挖去 1 天，平年的 2 月只有 28 天，闰年的 2 月也仅 29 天，奥古斯都的这些改动人为地造成了历法的复杂化。经儒略·恺撒和奥古斯都改革后的历法称为儒略历。

公元 325 年，欧洲基督教国家的一次宗教大会上，决定共同采用儒略历，当时还根据天文观测把春分日定在 3 月 21 日。儒略历所采用的年平均长度为 365.25 天，比实际回归年的长度稍长，大约每过 128 年要多一天，这样从公元 325 年到 1582 年，就形成了 10 天的累计误差，春分日已不在 3 月 21 日，而是向前移到 3 月 11 日了。于是，当时在位的罗马教皇格里高里十三世在 1582 年颁布了改历命令，规定 1582 年 10 月 4 日以后的一天为 1582 年 10 月 15 日，即跳过 10 天，以便使春分日重新回到 3 月 21 日。他还规定平常的年被 4 除尽的为闰年，但世纪年只有被 400 除尽的才是闰年，因此每 400 年中减少了 3 个闰年，年平均长度降至 365.242 5 天，要经过 3 000 多年，春分日才和实际天象相差 1 天。正因为这种历法很精确，此后陆续被世界各国所采用，成为当今世界上各国共同采用的公历。

二、阴历

阴历又称太阴历，它以月亮的盈亏周期为基准，把这种周期称为“月”，即朔望月。1 个朔望月中平均含有 29.53 059 天。阴历要求所制定的历法能尽量准确地反映月相，于是在每个“太阴年”中设 12 个月，然后在大月（30 天）和小月（29 天）交替排列的基础上，再在 30 个太阴年中，增加 11 天。于是在 30 个太阴年中，共有

$$30 \times 12 \times (30 + 29)/2 + 11 = 10\,631(\text{天})$$

而 30 个太阴年，每年 12 个朔望月的准确天数应为

$$30 \times 12 \times 29.530\,59\,\text{天} = 10\,631.012\,4(\text{天})$$

这表明，在 30 个太阴年中，两者的差值只有 0.012 4 天。也就是说，采用这种安排的阴历能相当准确地反映月相的盈亏周期。

现今，伊斯兰历是太阴历的典型代表。它的每个朔望月，排定为单数月 29 天，双数月 30 天，然后在 30 个太阴年的第 2，5，7，10，13，16，18，21，24，26，29 年的 12 月底，增加 1 天，由于作为双数月的 12 月是大月(30 天)，所以增加的 1 天为 12 月 31 日。于是，伊斯兰历平常年份为 354 天，而增加了 1 天的闰年为 355 天。伊斯兰历的纪元元年的元旦对应于现行公历 622 年 7 月 16 日。

阴历的优点是对潮汐预测和安排渔业生产有一定作用。但是这种历法中平常的太阴年只有 354 天，然后在 30 年中再增加 11 天，即每个太阴年的长度只有 354＋11/30 即 354.366 7 天，这样的太阴年其长度与回归年 365.242 2 天相差达 10.875 5 天。于是，只要经过近 17 年，就会相差公历半年。用这样的历法，17 年后，冬天和夏天就完全颠倒了。这是十分不方便的。事实上，即使在伊斯兰世界中，这种历法也仅仅是因为宗教上的需要才存在的，为了农牧业的需要则依然使用公历。

三、阴阳合历

阴阳合历将回归年和朔望月并列为制历的基本周期。这种历法既要尽可能保证日历中每个月初一时，月相处于“朔”，又要保证日历中一年的平均长度与太阳周年视运动周期(回归年)相一致。由于回归年(今测值长达 365.242 2 天)和朔望月(平均为 29.530 59 天)之间没有公约数，所以只有采取大多数年份 1 年为 12 个朔望月，而少数年份再增设 1 个闰月的办法来调节两者之间的关系。中国古代历法和由它延续至今的农历就是典型的阴阳合历。中国古代很早就开始对回归年长度进行实测。实测所使用的仪器圭表看似简单，但长期坚持使用却有很高的精度。圭表由严格按照正南北方向水平放置的尺(称为圭)和在圭的南端与圭面相垂直竖立着的标杆(称为表)两部分构成(见图 2-8)。表的上端往往有一圆孔，正午时太阳照射圆孔所产生的影子正好位于圭面的中央。每年冬至日，太阳上中天时，它在子午圈上地平高度最低，因此它照射圆孔的光影在圭面上必然离表的底部最远，长年累月的测量便可定出回归年的长度。南宋庆元五年(1199 年)，杨忠辅创制《统天历》时，已用圭表测得回归年的长度为 365.242 5 天，和国际上通用的格里历的回归年长度完全一样，但前者比后者早了近 400 年。为何中国古代使用圭表能获得如此高的精度？这主要是由于中国自西周时代起就已开始使用圭表测影，而从春秋时期鲁隐公元年(公元前 722 年)起，使用干支纪日(以十个天干、十二个地支组合而成的一种以 60 为周期的序数)记录的日期顺序再也没有间断过。因此，杨忠辅所测的冬至日甚至可以和鲁隐公时代的测影记录相比对，取两个冬至日之间相隔了多少天，

再除以这期间相隔了多少个回归年，从而获得结果。由于其中相隔了几乎近 2 000 年，结果测量精度也就提高了近 2 000 倍。这正是中国古代圭表测影的精度如此之高的原因。

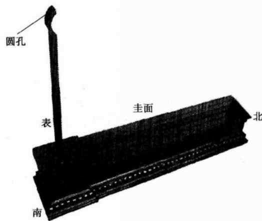


图 2-8 圭 表

中国的阴阳合历，一年 12 个朔望月时，年长仅 354 天或 355 天，当增加一个闰月时，年长则长达 383 或 384 天。使用这种历法，是难于安排好农事活动的。为了解决这个困难，中国西汉时期，又产生了完整的二十四气。从冬至开始，二十四气的顺序是冬至、小寒、大寒、立春、雨水、惊蛰、春分、清明、谷雨、立夏、小满、芒种、夏至、小暑、大暑、立秋、处暑、白露、秋分、寒露、霜降、立冬、小雪、大雪。起初是把一回归年按时间平均分成 24 等份来设置二十四气。但到唐代天文学家一行编算《大衍历》时，考虑到太阳在黄道上周年视运动的不均匀性，他将黄道等分为 24 份，在天球上自西向东黄经每增加 15°为一气。此后这种划分二十四气的方法一直沿用下来了。二十四气与公历的日期有严格的对应性，这从图 2-9 中可以看出。二十四气是中国历法中的阳历成分，二十四气设立后，人们正是依据它来安排各项农事活动的。

中国古代历法中，闰月的设置起初主要是依据十九年七闰之类的闰周，由制历者来编排的。后来则逐渐形成了一套设置闰月的规范方法，并沿用至今。这种规范方法便是：把二十四气分成两类，一类以冬至开始，每隔一气入选，如冬至、大寒、雨水、春分、谷雨、小满、夏至、大暑、处暑、秋分、霜降、小雪，共十二气，称为中气；另一类是余下的十二气，称为节气。规定某个朔望月中，若不包含中气，这个月份就不是正规的月份，而算成上一个月的闰月。但若某个月首尾有两个中气，那么下个月或下下个月即使没有中气，这个没有中气的月依然不算闰月，而算正常的月份。总而言之，依据这项规定，从长时期看，每年要保证都有 12 个中气。用这种办法解决回归年与朔望月之间

的调节问题。

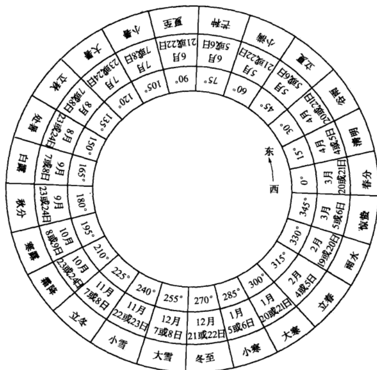


图 2-9　二十四气(最外圈)和太阳黄经(最内圈)以及公历日期的对应关系(其中太阳黄经是从春分点起沿黄道自西向东量度,或从北天极看沿黄道逆时针方向量度)

第三章　天文学探测手段

第一节　电磁波谱和大气窗口

一、电磁波谱

天体辐射的电磁波按波长 λ 由短到长分为如下 6 个波段。

γ 射线：$\lambda < 0.002\ \text{nm}(1\ \text{nm} = 10^{-9}\ \text{m})$；

X 射线：$0.002\ \text{nm} < \lambda < 10\ \text{nm}$；

紫外线：$10\ \text{nm} < \lambda < 0.4\ \mu\text{m}(1\ \mu\text{m} = 10^{-6}\ \text{m})$；

可见光：$0.4\ \mu\text{m} < \lambda < 0.7\ \mu\text{m}$；

红外线：$0.7\ \mu\text{m} < \lambda < 1\ \text{mm}$；

射电波：$\lambda > 1\ \text{mm}$。

6 个波段的界线只是一个大致的分法，实际上有些波段的分界处，如 γ 射线与 X 射线的分界处、红外线与射电波的分界处，都存在着彼此重叠的情况。

除电磁辐射外，还存在宇宙射线、中微子辐射和引力波等，但它们或者难于探测甚至很难捕捉到，或者只是处于刚开始寻找其蛛丝马迹，远没有达到如电磁波那样能提供天体信息的地步。

以上各种电磁波的波长 λ 和频率 ν 之间存在着如下关系

$$\lambda\nu = c \tag{3-1}$$

其中 c 为光速。它表明所有的电磁波在太空中都是以光速传播的。

对于波长最长的射电波，习惯上采用它的频率 ν 即每秒钟的振动次数(单位为赫兹，

即 Hz)表示,而较少采用波长 λ 来表示。

在公式(3-1)中,取光速 $c = 3\times10^8$ m/s,则射电波的频率 ν 与其波长 λ 之间存在着关系式

$$\nu = 3\times10^8/\lambda \tag{3-2}$$

该式中的 λ 用 m 为单位,所获得的 ν 则以 Hz 为单位。

对于光子能量很高的 X 射线和 γ 射线而言,往往既不采用相应射线的波长 λ,又不采用其频率 ν,而是用它的光子能量 E 为多少电子伏来表示。可以推算出光子的能量 E 与波长 λ 之间关系为

$$E = 1\,240/\lambda \tag{3-3}$$

式中 λ 以 nm 为单位,所获得的光子能量 E 以 eV 为单位。

二、大气窗口

不少波段的天体辐射无法穿过地球大气,能穿过大气的那些波段,称为大气窗口。最主要的大气窗口是光学窗口和射电窗口,此外还有一个不完整的红外窗口,即红外波段某些特定的波长小区间可以透过天体辐射,而其余大部分波长处无法透过天体辐射。(见图 3-1)

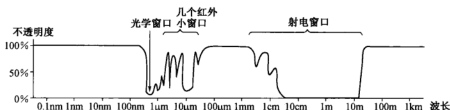


图 3-1　大气窗口示意图

下面分别对光学窗口、射电窗口和红外窗口作一简述。

(1) 光学窗口:是指可见光及其两侧的近红外光、近紫外光所构成的窗口。在天气晴朗的条件下,波长 0.4～0.7 μm 的可见光受到地球大气的选择吸收甚少,它能透过大气,但会因大气的散射而减弱。对波长为 0.3～0.4 μm 的天体的近紫外光,大气散射的减光作用更明显,但依然可以部分透过。对波长稍长于 0.7 μm 的近红外光,会受到大气中水汽分子的严重吸收,但有些观测地点上空,大气较干燥,天体的近红外光可以部分通过。

(2) 射电窗口:对频率 10 MHz(1 MHz=10^6 Hz)至 300 GHz(1 GHz=10^9 Hz)的天体的射电波,即相当于波长从 30 m 到短至 1 mm 的天体的射电波,地球大气是透明或部

分透明的，它称为射电窗口。但对于频率低于 10 MHz，即波长长于 30 m 的天体射电波，由于被地球高空的电离层所反射，它无法穿入地球大气层。

(3) 红外窗口：它是指在红外波段存在着的若干个小窗口。地球大气中的水汽在红外波段造成约 10 个吸收带，二氧化碳和臭氧层在红外波段各产生 1 个吸收带。由于这些吸收带的存在，地面上对天体的红外探测往往只能在这些吸收带的间隙处进行。现已获得可进行地面红外探测的 7 个带，这 7 个带的专名和对应的中心波长(以 μm 为单位)分别为

J带	H带	K带	L带	M带	N带	Q带
1.2	1.6	2.2	3.5	5.0	10.2	21

这 7 个带构成了地球大气在红外波段的小窗口。

由于地面红外探测的最大危害是水汽造成的吸收带，而水汽主要在低层大气中，使用高空飞机和高空气球可以摆脱水汽吸收带的影响，大大扩展红外探测的波段范围。而要消除二氧化碳分子和臭氧分子造成的红外吸收带，则必需到大气外进行探测。

第二节　天文望远镜的光学系统

本节所指的天文望远镜是地面上通过光学窗口观测天体的望远镜。1609 年，伽利略(Galileo)率先用自己研制的望远镜观测天体，开创了望远镜天文学的新时代。伽利略研制的望远镜是用人眼进行目视观测的望远镜，称为目视望远镜。

一、表征天文望远镜光学性能的物理量

对于目视望远镜，表征它们光学性能的物理量有以下 6 个：

(1) 口径：它是指物镜的有效口径，即未被镜框挡住的那部分物镜的直径；

(2) 相对口径：指物镜的口径和焦距的比值；

(3) 放大率：目视望远镜的放大率 G 是指角放大率，它等于物镜焦距 F 和目镜焦距 f 的比值，即

$$G = F/f \tag{3-4}$$

(4) 视场：指能被望远镜良好成像的天空区域的角直径；

(5) 贯穿本领：晴朗无月之夜，用望远镜看到的天顶附近最暗白色恒星的视星等(视星等概念见本章第三节)；

(6) 分辨角：指刚刚能被望远镜分辨开的天球上两点间的角距离。

以上这些物理量中，究竟哪个最重要？有人认为放大率最重要，这实际上是一种误解。前文已述，目视望远镜的放大率等于物镜的焦距与目镜的焦距之比，一架目视望远镜往往配备多个焦距不同的目镜，因而往往会具有多种不同的放大率。有些小型目视望远镜的制造商为了迎合人们追求高放大率的心理，往往会配备一个焦距特别短的目镜，从而获得很高的放大率，然后宣称他们的望远镜最大可以放大多少倍，以吸引顾客购买。实际上，这个焦距特别短的目镜只是一个摆设，在天文观测中根本用不上。目视望远镜最重要的参数是物镜口径的大小而不是放大率的高低。口径越大，它收集天体的光就越多，从而能看到更暗弱的恒星；口径越大，它的分辨角就越小，分辨近距双星的本领就越大，也就更能看清有视面天体如月球、行星、星团、星云等的细节；甚至有效的最大放大率也与物镜的口径有关，天文观测的经验表明，中小型目视望远镜有效的最大放大率往往取为物镜毫米数的 3 倍左右，在此值以上再加大放大率将毫无助益。

二、折射望远镜的光学系统

伽利略研制的望远镜全都属于折射望远镜，其中最出色的一架物镜口径约 4 cm，该物镜是一块凸透镜，星光通过它的折射，在还未会聚到物镜的焦点时就被一个由凹透镜做成的目镜所发散，变成平行光从目镜射出[见图 3-2(a)]，这种望远镜叫伽利略式折射望远镜。此后不久，德国的开普勒(J. Kepler)从理论上提出了一种系统：星光射向由凸透镜构成的物镜后聚焦于 A 点的焦平面上[图 3-2(b)]，但 A 处又位于由凸透镜构成的目镜的焦平面上，聚集在该处的星光向前行进时，经该目镜所发散，变成平行光射出，这种望远镜叫开普勒式折射望远镜，由于这种望远镜可以在物镜和目镜的共同焦平面 A 处安装用于测量的“十”字细丝或坐标网格，所以后来用于目视观测的折射望远镜都做成开普勒式的了。

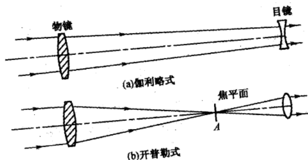


图 3-2　两种用于目视观测的折射望远镜

早期的折射望远镜，物镜是单块凸透镜，它有严重的色差，即由不同颜色(不同波长)混合的星光构成的像，呈现为彩色光斑，像的清晰度很低。当时唯一的补救措施是尽量减小物镜表面的曲率，因为在这种情况下，色差会大大减弱。但这样做，物镜的焦距和镜筒的尺寸必然拉得很长，在 17 世纪和 18 世纪上半叶流行的正是这种使用起来极不方便的长镜身望远镜。直到 18 世纪中叶，人们用冕牌玻璃做凸透镜，火石玻璃做凹透镜，组合成能会聚光的消色差复合透镜，用它做物镜，才结束折射望远镜长镜身的时代，成像质量也大大提高。(见图 3－3)

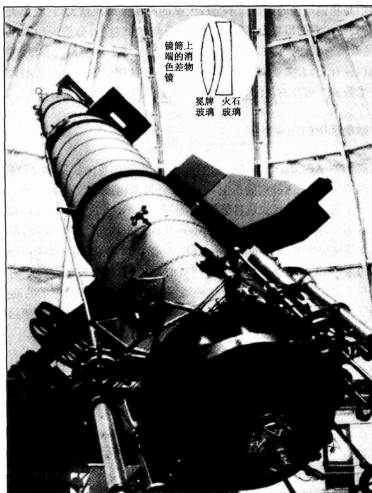


图 3－3 世界上最大的折射望远镜(其右上角是它的消色差物镜示意图)

世界上最大的折射望远镜由美国光学家克拉克(A. G. Clark)在1895年建成,其消色差物镜的口径为1.02 m。它于1897年在美国叶凯士天文台启用。该望远镜不仅光学质量极佳,而且机械装置也运转自如。

三、反射望远镜的光学系统

1668年,著名科学家牛顿(I. Newton)发明了世界上第一架反射望远镜。它的光学系统称为牛顿式反射望远镜;1672年,法国科学家卡塞格林(G. D. Cassegrain)提出另一种反射望远镜的设计方案,根据该方案制成的望远镜称为卡塞格林式反射望远镜。这两种反射望远镜的物镜都由主镜和副镜构成,前者的主镜是抛物面反射镜,副镜是安装在主镜焦点前与光轴成45°的平面反射镜,主镜聚焦后的星光由副镜反射至镜筒一侧的开口处之外[见图3-4(a)];后者的主镜也是抛物面反射镜,中间挖有一个圆孔,而副镜是一块放在主镜焦点前的凸双曲面镜,它把主镜聚焦的星光再次反射,穿过主镜中间的圆孔聚焦在主镜背后的焦点上[见图3-4(b)]。除上面两种系统外,反射望远镜还有单块反射物镜构成的主焦点系统等多种系统。一些口径较大的望远镜往往兼具数种光学系统,根据不同工作需要随时加以变换。

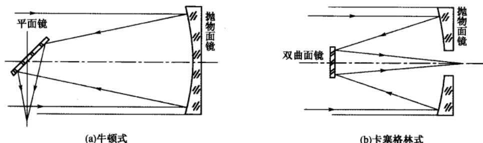


图3-4 反射望远镜的两种光学系统

1948年,美国帕洛马山天文台建成口径5.08 m的反射望远镜(见图3-5),它兼备卡塞格林系统、主焦点系统等多种光学系统。此后近30年中,它一直是世界上的“望远镜之王”。

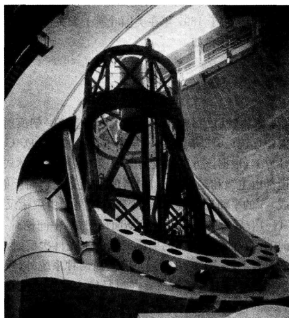


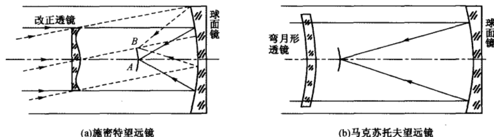
图 3-5 口径 5.08 m 的反射望远镜

四、折反射望远镜的光学系统

消色差折射望远镜的视场远比反射望远镜大，一般可达 2°左右，它的星像明锐稳定，适合于做天体测量方面的工作，也比较适合于进行目视观测；反射望远镜口径可以做得很大，有利于探测极暗弱的天体，它又没有色差，因而很适合于做天体物理方面的工作，但这种望远镜深受彗差的祸害，它会使离视场中央稍远处的星像呈彗形象斑，这使得反射望远镜的视场很小，往往只有 0.1°甚至更小。这对于天体物理中的巡天（它需要普查全天或很大天空区域内的某种类型的天体）工作很不利，于是一种适合于做巡天工作的视场很大的望远镜应运而生，它便是折反射望远镜。

折反射望远镜中有一种称施密特望远镜，它是由德国光学家施密特（B. V. Schmidt）在 1931 年发明的，它的主镜是球面反射镜，主镜前面有一块形状特殊的改正透镜，改正透境的前表面是平的，后表面的中央和外侧稍稍凸起，其口径为主镜的 2/3，与光轴平行的入射光线聚焦于图 3-6(a)中的 *A* 点，而入射到改正镜和球面反射镜边缘的光则聚焦于 *B* 点，这种折反射望远镜的成像面是凸球面，它的成像质量很好，视场也很大。目前世界上

口径最大的施密特望远镜安装在德国史瓦西天文台，其球面主镜和改正透镜的尺寸分别为 2 m 和 1.34 m，视场达 3.4°。另一种折反射望远镜称马克苏托夫望远镜，它是 1940 年由苏联光学家马克苏托夫（Д. Д. Максутов）发明的，其主镜也是球面反射镜，而主镜前面的改正透镜呈弯月形[见图 3－6(b)]。这种类型的折反射望远镜视场也很大，其成像面也是凸球面。由于设计要求，改正透镜的厚度需要达到主镜口径的 10%。如果改正透镜太厚，则吸收星光就太多，故这种类型的望远镜不能做得很大。目前世界上最大的马克苏托夫望远镜其主镜和弯月形改正透镜的尺寸分别为 0.98，0.70 m，远比世界上最大的施密特望远镜小得多。



(a)施密特望远镜　　(b)马克苏托夫望远镜

图 3－6　两种折反射望远镜的光路

上述两种折反射望远镜的成像面都是凸球面，而且又位于望远镜光学系统的内部，它不能用于目视观测，只能安装形状特殊的底片进行照相观测。

五、反射望远镜的超大型化

整块型大镜面反射望远镜口径达到 5.08 m 以后，要再加大口径出现了两大困难：一是由于传统的大反射镜面相当厚，镜面重量很大，它在镜筒指向不同方位时重力形变较大，望远镜观测室中温度变化造成的镜面热形变也较大，结果星像质量下降；二是随着口径加大，观测地的气流对望远镜成像质量的影响也更明显。怎样才能建成光学质量一流的超大型反射望远镜呢？20 世纪 90 年代，人们凭借高速发展的电子计算机技术，采用了薄镜镶拼、主动光学和自适应光学三大革新手段，终于使反射望远镜的超大型化成为可能。1992 年和 1996 年，美国在夏威夷莫纳克亚山先后建成的两台凯克超大型反射望远镜（“凯克 1 号”和“凯克 2 号”），正是采用上述三种革新手段成功的典型。

凯克反射望远镜的物镜采用薄镜镶拼技术，它用 36 块对角直径为 1.8 m 的正六边形镜面拼成一个超巨型反射镜面，其整体形状仍为六边形，其中中央绘有斜线的小六边形是空洞（见图 3－7）。该镜面最大直径为 10.91 m，反射面总面积为 75.76 m^2，十分接

近中央开有同样大小圆孔、口径 10 m 的圆形镜面的面积，因而常被人称为凯克 10 m 反射望远镜。

凯克反射望远镜每块镜面的厚度仅为 10 cm，镶拼而成的大镜面比 5.08 m 大望远镜的主镜还轻，为克服重力形变和热形变造成的镜面变形，研制者对望远镜镜面设置了一套计算机控制系统，而在薄镜面的背后安装了一组与计算器控制系统相连的促动器，计算机随时可以测知镜面存在的形变，它指令不同部位的促动器随时施加影响，使镜面始终保持在最佳形状和最佳工作状态，这便是主动光学的含义。

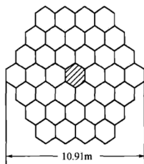


图 3-7 凯克反射望远镜镶拼方案示意图

凯克反射望远镜还采用了自适应光学技术，它能通过计算机实时检测受气流的扰动而变形的光波球形波阵面(光波振动相位相同的点构成的面)，并与理想波阵面进行比较，将发现的差异进行实时纠正，从而使大气湍流对成像质量的不良影响降至最低。

“凯克 1 号”和“凯克 2 号”反射望远镜之间的距离为 85 m，两者不仅各自都可以在光学波段和红外波段独立进行观测，而且还可以用预定波长的单色光对同一天体进行干涉测量，这时两台望远镜就变成了一台光学干涉仪或红外干涉仪(见图 3-8)，它将具有口径 85 m(两望远镜的距离)的望远镜的小分辨角，而收集光的能力则相当于一台口径 14 m 的大反射望远镜。

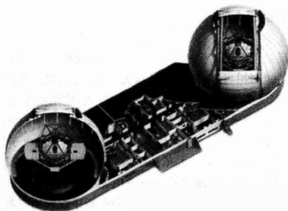


图 3-8 两台凯克望远镜正在对同一天体进行干涉测量

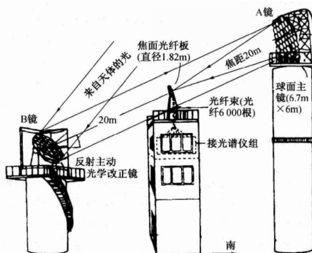
“凯克 1 号”和“凯克 2 号”反射望远镜建成后不久，超大型反射望远镜像雨后春笋般

涌现出来，其中最著名的是由欧洲 8 个国家共同经营的欧洲南方天文台在智利北部帕瑞纳山建造的 4 台甚大望远镜，每台口径 8.2 m，这 4 台望远镜在 1999—2000 年先后落成，它们以每台之间 50 m 的间距一字排开。此外，1999—2005 年，世界各国建成口径大于 8 m 的超大型反射望远镜还有 5～6 台之多。这些超大型反射望远镜有的是镶拼式物镜，有的是单块型大物镜，但它们都有共同的特点，就是都是厚度很薄的物镜，而且都是采用主动光学和自适应光学这两种最新的技术。

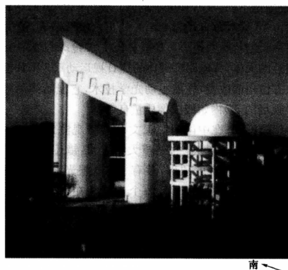
六、中国的 LAMOST

LAMOST 的原名是大天区面积多目标光纤光谱望远镜，它是该望远镜英文名称“large sky area multi-object fiber spectroscopy telescope”的缩写词，是一架光谱巡天的专用望远镜。LAMOST 的主反射镜[图 3 - 9(a)中称为 A 镜]由 37 块对角直径 1.1 m 的正六边形镶拼而成，其镶拼情况与图 3 - 7 所示凯克反射望远镜十分类似，只是在中心处没有空洞，依然有一块正六边形镜。它是一块大型正六边形凹球面镜，对角直径 6.7 m，对边直径 6 m，球面的曲率半径为 40 m，在它的焦距 20 m 处有一直径 1.82 m 的焦平面，A 镜和它的焦平面位置固定不动。LAMOST 的改正镜[图 3 - 9(a)中称为 B 镜]也是一块镶拼式的反射镜，它由 24 块对角直径为 1.1 m 的正六边形组成，镶拼后的反射镜不再呈正六边形，而是略显扁长的特殊六边形。B 镜安装在 A 镜球心处一个地平式装置的基座上，它对着上中天附近的天体，并能跟踪天体的周日视运动 1.5 h，B 镜的表面形状会随着待测天体的天顶距、方位角而改变，凭借主动光学技术，它能始终消除 A 镜的像差，使焦平面上 1.8 m 范围(视场约 5°)内始终成像质量良好。

2008 年 10 月，LAMOST 在中国国家天文台兴隆观测站落成，它的不同部分分别安装在南北方向上 40 多米一字排开的三幢大楼上：B 镜位于最北端一幢 5 层楼的顶部；A 镜位于最南端一幢 10 层楼的顶部；装有 4 000 根光纤的成像焦平面位于上述两幢楼之间正中位置的一幢 8 层楼的顶部，每个光纤头在两个方向上可以转动，以便能对准选定天区的约 4 000 颗恒星中的一颗，所获得的星光分别传输到 16 台光谱仪中，利用国际上先进的光谱成像技术，每台光谱仪可同时获得 250 颗恒星的光谱，最后获得所有这些恒星的光谱。LAMOST 的建筑物外景如图 3 - 9(b)图所示。它是当今世界上口径最大、视场也最大的结构独特的施密特望远镜，也是世界上光谱观测中获得率最高的望远镜。



(a) 光学系统示意图



(b) 外景图

图3-9 中国的LAMOST望远镜

第三节　地面上的光学观测和红外探测

一、辐射探测器

辐射探测器是感知和测量天体辐射的器件。人眼曾经是人类观测天体唯一的辐射探测器，它能分辨出慢于 0.05 s 的天体的变化，但由于存在视觉暂留现象，无法分辨出快于 25 次每秒的天体的闪现现象。人眼只能看到天体的可见光，无法感知其他波段的辐射；人眼的另一重要缺陷是主观性强，观测对象较暗弱时容易产生视错觉，十分典型的例子是，一个多世纪前有几位天文学家声称看到了火星上的“运河”，但实际上完全是子虚乌有。

更客观的辐射探测器是 19 世纪中叶问世的照相底片。专门用于拍摄暗弱天体的天文底片在低照度时比一般底片有高得多的灵敏度，而且长时间曝光能累积暗弱天体的辐射，使之在底片上成像。照相底片还具有文献性，即底片上被摄天体的像可以作为文献资料长期保存，还可以用特定仪器对它进行精密测量。通过对底片的照相乳胶进行特殊处理，它可以对天体的红光甚至红外光感光。因此，照相底片大大扩展了人眼观测波段的范围。底片的另一优点是信息量极大，同一张底片上往往可以拍下数以万计的暗弱恒星。天文底片的这些长处，使它在 19 世纪末至 20 世纪中期一度成为天文学家的宠儿。

照相底片也有两大缺陷：一是量子效率（使底片上的乳胶析出一个变黑的银盐颗粒所需要的入射光子数的多少）很低，通常未经敏化处理的底片量子效率只有 0.1%～1%，而经过敏化处理后的底片其量子效率也只能升至 4%；二是底片的非线性，即底片上星像的变黑程度往往不与天体的入射光子数呈线性关系。这两个缺陷使照相观测灵敏度较低，而且其资料处理的工作量大，测量精度低。

在高精度的天体光度测量工作中，往往使用光电倍增管为辐射探测器。光电倍增管由安装在真空密封管内的光阴极、很多个倍增次极和最终收集电子的阳极构成。若一颗暗星的光通过望远镜入射到光电倍增管的光阴极上，光阴极产生的光电子在电场作用下投射到第一个倍增次极上，由于第一个倍增次极的电压比光阴极高，而且以后每个倍增次极的电压总比前一个倍增次极更高，于是在电场作用下每个倍增次极所发出的二次电子会越来越多，这样的倍增次极往往有 10 多个，结果阳极接收到最后一个倍增次极的二次电子时，其电子数很可能比光阴极最初产生的光电子数多 10^6 倍，这些电子将在回路中产生可检测到的光电流（见图 3-10）。光电倍增管线性范围很大，甚至在天体的视亮度相差上千万倍时，它检测到的光电流依然是按比例变化的。光电

倍增管的量子效率(入射在光阴极上的一个光子所能直接激发的光电子数)可高达40%,比照相底片要高1~2个数量级。它的时间分辨率也很高,即它也适用于观测天体亮度的快速变化。

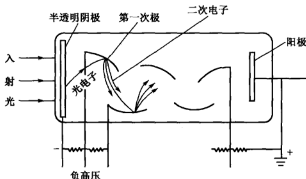


图 3-10 光电倍增管的工作原理

光电倍增管每次只能测量一个天体的总亮度。20世纪下半叶问世的CCD则是一种十分出色的二维光电器件。CCD是英文(charge-coupled device)的缩写词,中文译名为电荷耦合器件,它由极薄的硅晶片做成,其内部被分成几百万甚至几千万个极其微小的单元,称为像素。当入射的光子撞击到一个像素上,光子立即转变为电子并被传输到输出端的记录器上,然后由电子计算机进行处理,把各个像素上传来的信息转换成图像。CCD中每个像素的量子效率大于50%,有时甚至高达80%。它在天体辐射强度变化1万倍甚至10万倍时其响应依然是线性的,而且响应的时间分辨率也很高,也就是说它也适合于观测辐射强度快速变化的天体。总之,可以说CCD兼具了照相底片和光电倍增管两者的优点,因此它在天文观测中应用越来越广泛,有逐渐取代照相底片的趋势。

上面介绍的人眼、照相底片、光电倍增管和CCD是地面上的天文观测中最重要的几种辐射探测器。

二、天体的成像观测

19世纪中叶照相术问世后,在可见光的天文观测中,由于照相观测比目视观测有许多无可替代的优点,人们纷纷将原先的目视望远镜改装成照相望远镜。图3-11是一架折射式照相望远镜的光路,其中照相底片被安置于物镜的焦平面上,于是平行于光轴方向射来的星光S聚焦于物镜的焦点F(底片中央)处,而与光轴倾斜的星光S'成像于底片

上 L 处。

在照相观测中，对天体的成像观测是许多其他工作的基础。例如，要发现变星、新星或太阳系内的新的小行星、新的彗星都需要获得某特定天区的底片，有时甚至要获得同一天区在不同日期拍摄的底片来进行比对；类似地，对恒星的照相测光工作也必须先获得某特定天区的底片。

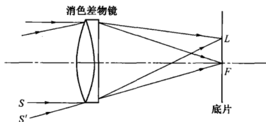


图 3-11　折射式照相望远镜的光路

与照相底片相类似，CCD 也是一种二维的辐射探测器，而且它又有高得多的量子效率，其响应还随星光的强弱线性变化，所获得的数据又易于用计算机处理，所以在天体的成像观测中，用 CCD 代替照相底片已成为一种发展趋势。许多有视面的天体，如行星、彗星、星团、星云、河外星系等，它们色彩绚丽，人们既可以使用彩色底片和彩色照相方法，也可使用 CCD 的电子成像技术，来获得它们的彩色照片。

三、天体测光

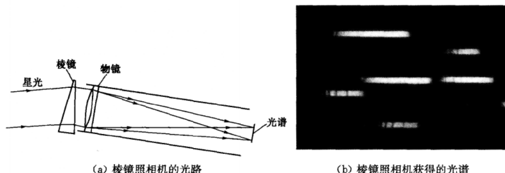
天体测光（又称天体光度测量）需要测定的是天体的视星等，即辐射探测器直接测得的星等。早在公元前 2 世纪，古希腊天文学家依巴谷（Hipparchus）已把肉眼可见恒星的亮度分为 6 等，最亮的为 1 等星，勉强可见的暗星为 6 等星。1856 年，英国天文学家普森（N. R. Pogson）发现 1 等星约比 6 等星亮 100 倍，于是就将这种关系推广到所有恒星，将两颗相差 5 个星等的恒星亮度之比定为 100 倍，即星等相差 1 等的两颗恒星亮度之比定为 $100^{0.2}$ 即 2.512 倍，从而为恒星的视星等和它的视亮度之间建立了定量关系。

19 世纪中叶，目视光度计被用于进行恒星的目视测光，它的测量误差可达 0.1～0.2 星等，由于精度低，目视测光现在已很少采用。19 世纪末，人们用专门的光度计测量拍摄在底片上星像的变黑程度，这被称为照相测光，它的测量精度约为百分之几星等。20 世纪中叶，人们把光电倍增管安装在专门的光电光度计中测量天体的视星等，这种光电测光方法的测量精度可达千分之几星等。使用 CCD 也可以进行天体测光工作，它的测量精度介于照相测光和光电测光之间，但它消除了光电测光中每次只能测量一个天体亮度的缺陷。

天体测光中一项重要工作是设法对天体辐射分成几个小波段分别进行测量，这被称为多色测光，其中最著名的是光电测光中的 U（紫外）、B（蓝）、V（黄）三色测光。至于 U，B，V 三色测光的严格定义和怎样开展这种测光，由于比较专深，此处只能省略。

四、天体光谱的获得

星光中隐含着揭示天体自身奥秘的“密码”，破译这种密码往往需要先获得天体的光谱。获得天体的光谱需要采用各种类型的分光设备，其中最简单的一种是棱镜照相机。在照相望远镜的物镜前面加上一块物端棱镜，于是这架带着物端棱镜的照相望远镜便成了一台巨大的棱镜照相机[图 3-12(a)]。来自望远镜视场内不同的遥远恒星，经过物端棱镜的色散，再经过望远镜物镜的成像，结果在底片上形成很多条光谱[见图 3-12(b)]。若望远镜物镜的焦平面上放置 CCD，也同样可以获得很多颗恒星的光谱。



(a) 棱镜照相机的光路　　(b) 棱镜照相机获得的光谱

图 3-12　棱镜照相机的光路和获得的光谱

棱镜照相机获得的天体光谱其色散度(对不同波长的光的分解本领)较小，在底片上呈现为一条条短光谱。而有入射狭缝的摄谱仪(称有缝摄谱仪)可以获得色散度更大、成像质量更佳的天体光谱。图 3-13 是一架有缝棱镜摄谱仪的光路图，该摄谱仪放在望远镜的终端，望远镜的成像平面应与摄谱仪的入射狭缝所在平面重合，该狭缝又位于准直透镜的焦点上，于是狭缝处的星像经过准直透镜后变成平行光投射在棱镜上，经该棱镜色散和照相物镜成像后在底片上留下天体的光谱。

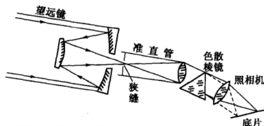


图 3-13　有缝棱镜摄谱仪的光路

前文已指出，照相底片作为辐射探测器存在着非线性的缺陷，它所获得的光谱的变黑程度不能很简洁地换算成天体各波长处的辐射强度，这对底片的后续处理工作很不利。可采取的办法是尽可能用线性的二维探测器 CCD 来替代底片，获得被测天体的光谱。

获得天体的光谱之后，经过对它的光谱的精细测量，配合量子力学、恒星大气理论等对谱线形成机制的理论分析，可以获得天体的化学组成和物理性质的大量信息。

五、地面上的红外探测概述

红外波段某些特定的小波长区间的红外光可以穿过大气，被地面上的红外望远镜探测到，但红外天体的温度不高，处于常温下的仪器设备的温度辐射和天空发出的背景辐射常常可以把它们掩盖掉。因此，在地面上探测和搜寻红外天体，必须采取多种特殊措施。

在望远镜方面，地面红外探测通常使用口径较大的卡塞格林式反射望远镜，为了减少进入望远镜物镜焦平面上的散射光，除镜面本身外，镜筒内表面等部位往往涂黑，而且还需对望远镜和望远镜所在的圆顶室采用有助于减少仪器辐射和环境辐射的种种改进。

在辐射探测器方面，红外探测应选用在低温条件下灵敏度依然很高的红外探测器，这些探测器被置于由液氮或液氦作为致冷剂的绝热容器中，容器的一侧有高透射率的保护窗，以便来自红外天体的辐射照到探测器上，使测量工作正常开展。把探测器放在低温条件下工作是为了减少仪器辐射，使它们不至于影响对天体红外的探测。

为了不让天空的红外背景辐射掩盖掉红外天体本身的辐射，红外探测往往采用“红外调制技术”，即让卡塞格林望远镜的副镜以每秒 5～10 次的频率晃动，使望远镜的视场中时而出现被探测的红外天体加上天空的红外背景辐射，时而则只有天空的红外背景辐射，于是红外天体变成了交变信号，而天空背景则成为不变信号，采用适当的电路便可将红外天体的信号分离出来，从而探测到了该红外天体。

第四节 射电天文探测

一、单天线射电望远镜

射电望远镜是探测天体射电辐射的基本设备。它主要由天馈系统、接收系统和记录显示系统三部分组成（见图 3－14）。天馈系统类似光学望远镜中的物镜，它由天线和馈源构成，两者分别用于会聚和收集天体的射电辐射，经传输线送入接收系统；接收系统对微弱的射电信号进行处理、放大并转换成可供显示的信息；最后，由记录显示系统反映出

获得的结果。

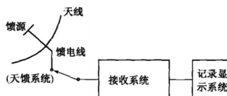


图 3-14 射电望远镜的基本结构

天线的类型有多种，其中最简单的是单个曲面的天线。单天线射电望远镜中一种重要类型是可跟踪的抛物面天线射电望远镜，它的天线能绕两个互相垂直的轴转动以便对着天空任何方向，并能跟踪射电源的周日视运动。探测宇宙中微弱的射电源，必须采用口径尽可能大的射电望远镜。目前世界上最大的可跟踪抛物面射电望远镜是 2000 年美国在格林班克建成的，天线口径 100 m×110 m(略显椭圆)。该天线是一种偏轴的抛物面，其一侧竖立一根巨大的支撑架，顶端位于偏轴抛物面的焦点处，那里装有接收射电波的馈源(见图 3-15)。与不同的接收系统相配合，它可以探测频率 100 GHz(波长 3 mm)至 100 MHz(波长 3 m)的射电辐射。

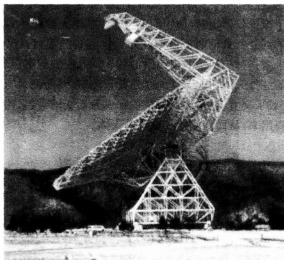


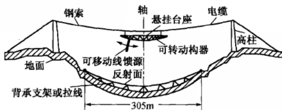
图 3-15 美国在格林班克的偏轴抛物面射电望远镜

单天线射电望远镜中另一种重要类型是大型的固定球面射电望远镜。1963 年，在美国阿雷西博建成了这样一台望远镜[见图 3-16(a)]，球面天线的口径为 305 m，后来经改

建增大到 366 m。该天线利用天然地形安置在一个山谷里，它静止不动地指向天顶，其上空悬挂着一个可转动和可移动的线馈源[见图 3-16(b)]。当该馈源运动时，可接收到球面天线不同部分反射到馈源上的射电信号，经电缆将信号传输到接收系统。使用该天线不同部分可以探测到离天顶 20°范围内各区域的微弱射电源，也可以对这一范围内做周日视运动的射电源进行跟踪探测。用不同的接收系统，该射电望远镜可以在工作频率 600 MHz(波长 50 cm)至 10 GHz(波长 3 cm)范围内进行射电探测。



(a) 全景图



(b) 结构示意图

图 3-16　阿雷西博固定球面射电望远镜

2008 年，中国开始建造一台 500 m 口径球面射电望远镜(简称 FAST)，预计在 2014 年完成。建成后它将是世界上最大的固定球面射电望远镜。该望远镜坐落在贵州省平塘县一个喀斯特地貌的巨大洼坑中，观测实时使用的区域是一个直径为 300 m 的球面，但随着天体的周日视运动，该区域将在这 500 m 的大球面上移动。与阿雷西博固定球面射电望远镜不同，它的球面形状不是固定不变的，而是采用类似于主动光学的主动反射

面技术，能实时地把探测目标所用到的那部分球面变成抛物面，于是该镜在跟踪探测目标的过程中，将依次变形成一系列 300 m 口径的抛物面天线，而馈源也能实时地同步移动。正是采用这一技术，FAST 可以探测到天顶四周 40°范围内的微弱射电源，远比阿雷西博射电望远镜大得多。用不同的接收系统，FAST 可以在工作频率 70 MHz（波长 4.3 m）至 3 GHz（波长 10 cm）范围内进行探测，其灵敏度也要比阿雷西博射电望远镜高一倍多。

二、从双天线干涉仪到甚长基线干涉测量网

为了对射电源进行精确定位和提高空间分辨本领，射电干涉仪应运而生，其中最简单的是由两个相同天线组合而成的双天线干涉仪。它们在同一频率（同一波长）上接收同一射电源发出的射电信号，如图 3-17 所示。射电波到达 A，B 两天线时会有一段路程差 BC。若此路程差正好是射电波半波长的偶数倍，则两天线收到的信号同位相，强度相加；若为半波长的奇数倍，则反位相，信号相互抵消。射电源的周日视运动导致到达 A，B 两天线的路程差在不断变化，信号到达两天线的位相差也在不断变化，最后可获得信号的干涉图像。双天线干涉仪的分辨本领等同于口径为 AB 的大射电望远镜的分辨本领。为了进一步提高空间分辨率，并增加接收信号的强度，以后又出现了一字形排开的多天线干涉仪。但在同一条直线上的干涉仪只能提高一维分辨率，要同时提高射电源二维分辨率就必须建造像“十”字形天线那种二维天线阵才行。

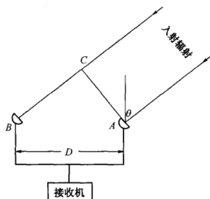


图 3-17 双天线干涉仪示意图

由于射电波的波长要比可见光波长长数千倍至数千万倍，射电探测要与光学观测有同样的分辨率，因此必须也按这样的比例加大双天线干涉仪或多天线干涉仪基线的尺

度，这在用电缆直接连接才能产生干涉效应的条件下是无法做到的。

20 世纪 60 年代后期诞生的甚长基线干涉仪其基线可达数千千米甚至上万千米，它已不必使用电缆连接，观测者只需让进行干涉测量的天线做到“三个同一”，即在同一时间、采用同一工作频率(同一工作波长)探测同一射电源即可。观测者在这种条件下把射电信号记录在磁带上，再把每两个天线探测到的信息一起送入处理机进行相关运算，就可以获得干涉结果(见图 3-18)。上面“三个同一”中十分重要的一点是干涉仪的各个天线都借助于精度极高的氢原子钟来进行时间比对，以便在探测过程中完全达到时间同步。

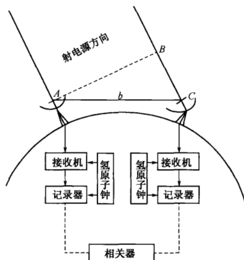


图 3-18　甚长基线干涉仪示意图

在同一条直线上的干涉仪只能提高一维分辨率，要提高射电源的二维分辨率，必须采用二维分布的长基线干涉仪或甚长基线干涉仪来进行测量，甚至目前世界上已采用甚长基线干涉测量网来进行探测。例如，我国上海天文台、乌鲁木齐天文站的两台口径 25 m 的射电望远镜以及南非哈特比斯托克射电天文台的口径 26 m 的射电望远镜都参加了欧洲甚长基线干涉测量网的联合探测工作。采用这样的探测，人们已可以获得0.001″的超高分辨率，这比地面上对天体的光学观测所能获得的最高分辨率要高几个数量级。

三、射电成像技术

早年射电探测的一个重要缺陷是难以获得射电源的像，但随着综合孔径射电望远镜的发明，这一缺陷已不复存在。综合孔径射电望远镜是一种分辨率和灵敏度都很高、能

让稳定的射电源成像的射电望远镜。如果你细看报上的任何一幅照片，其上的景物实际上不是一个连贯的图像，而是由无数明暗不同的小网点构成的。综合孔径射电望远镜的成像原理与此种网点有点类似，但更加复杂：若有 A 和 B 两根天线，假定 A 位于地面上一个等效大天线的圆心，而 B 则以较小的间隔距离在该等效大天线的所有位置上，都与 A 先后进行干涉测量。由于射电源是稳定的，这种先后进行的干涉等同于某一时刻所有 B 位置与 A 位置的干涉。将所有干涉测量的资料输入计算机，进行一种被叫做傅里叶变换的数学处理，可获得待测射电源亮度的二维分布，进而获得待测射电源结构的“照片”。在实际工作中，一个移动天线与一个固定天线一次次进行干涉观测和资料处理的工效太低，往往是用很多固定的和若干移动的天线互相干涉进行测量的。

上述射电成像的原理是英国射电天文学家赖尔(M. Ryle)首先提出来的，1971 年他主持研制了剑桥大学马拉德射电天文台的“五千米阵”。它由 8 面口径均为 13 m 的抛物面天线组成，其中 4 面固定地分开排列在 4.6 km 长的基线上，另外 4 面可在导轨上移动。当用工作频率 20 GHz(波长 1.5 cm)进行探测时，它绘出的射电天图，已可以与光学照片相媲美。这一成就开辟了射电探测的新纪元，他因此获 1974 年诺贝尔物理学奖。

目前世界上最出色的综合孔径射电望远镜是 1980 年建成的美国的甚大阵(见图 3－19)，它座落在美国新墨西哥州的一个荒原上，占地 1 000 多平方千米，由 27 面口径 25 m 的可移动抛物面天线组成，分别安置在呈“Y”形的 3 条 20～21 km 长的叉臂上，每条臂上放 9 面天线，使用其最短工作波长 0.7 cm 时，最小分辨角可达 0.05″，已优于地面上大型光学望远镜的分辨角。甚大阵在 8 h 中即可获得一幅射电源的优质图像。

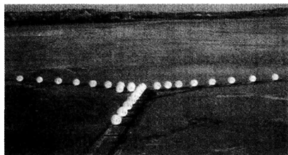


图 3－19 世界上最大的综合孔径射电望远镜——美国的甚大阵

2003 年，美国在夏威夷海拔 4 205 m 的莫纳克亚山上，建成了第一个工作在波长不足 1 mm 的亚毫米波段的综合孔径射电望远镜。它由 8 面口径 6 m 的天线组成一个阵列，其中两两相配时，最长的基线长为 509 m，在工作波长 0.43 mm 时，分辨角可小到 0.15″。这一望远镜阵是第一个在亚毫米波谱线上探测获得天体像的射电望远镜。

四、毫米波和亚毫米波的射电探测

20 世纪 60 年代，人们相继发现了星际羟基(OH)分子、星际氨(NH_3)分子、星际水(H_2O)分子和星际甲醛(HCHO)分子，特别是 1969 年所发现的甲醛分子是星际空间中发现的第一个有机分子，它成了 20 世纪 60 年代四大天文发现之一(另外三大发现是下文中涉及的宇宙背景辐射和射电脉冲星，以及类星体[①])。20 世纪 70 年代以后，新的发现更是络绎不绝，迄今发现的星际分子已有 100 多种，其中绝大多数是星际有机分子。这些星际分子的谱线大部分位于射电波的毫米波段(波长 1～10 mm)或亚毫米波段(波长 0.35～1 mm)，于是射电天文学中的毫米波和亚毫米波天文学便迅猛发展起来。

按照本章第一节的划分，波长小于 1 mm 的电磁波应属于红外线波段，但在 0.35～1 mm这一小段波段内则是射电波和红外线彼此重叠的区域：当使用亚毫米波射电望远镜和射电探测方法来探测这一小波段的电磁辐射时，它属于射电波中的亚毫米波；但当使用配备远红外探测器的红外空间望远镜探测这一小波段的电磁辐射时，它又属于红外线波段的一部分。

毫米波和亚毫米波射电探测的一项重要任务是发现新的星际分子，大部分的星际分子是美国基特峰天文台的毫米波射电望远镜发现的。该望远镜于 1967 年建成，当时的口径是 11 m(见图 3－20)，1984 年将它的口径加大到 12 m，2000 年因它完成了历史使命而被关闭。

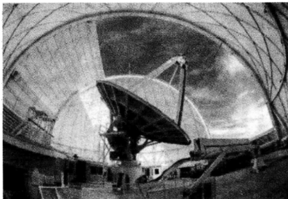


图 3－20　美国基特峰天文台口径 11 m 的毫米波射电望远镜

① 一种有强射电辐射或强紫外辐射的遥远天体。其光学像酷似恒星，但谱线有巨大的红移，而且单位时间里辐射的能量极大。类星体很可能是遥远活动星系的亮核。——作者注

毫米波与亚毫米波射电探测的另一重要任务是以已知的星际分子的谱线为探针，深入宇宙深处，获得光学波段甚至射电波的其他波段无法得到的天体信息。这方面一个典型的事例是，在星际空间中广泛存在的一氧化碳(CO)分子，发出波长为 2.60 mm，1.30 mm 和 0.87 mm 等谱线辐射，在这些谱线上进行毫米波和亚毫米波的射电探测，现已获得有关银河系中的暗星云、电离氢区、星周物质、银河系核心以及河外星系的大量信息。

毫米波和亚毫米波射电探测存在两方面的困难：一方面是这类望远镜的天线，其表面的精度通常要求达到工作波长的 1/20，制作它们并在实际观测中保持精度是比较困难的；另一方面是由于地球大气中氧和水汽的影响，毫米波与亚毫米波射电探测只能在若干特定波长处进行，而且在这些波长处射电波的透明度还随大气中水汽含量的多寡而异，所以毫米波与亚毫米波的射电探测望远镜必须选择大气中水汽含量小而稳定的地方作为台址。而大气中水汽的含量随海拔高度的增加而递减，因此毫米波射电探测往往选在海拔 2 000 m 以上的山上进行，而亚毫米波射电探测往往选在海拔 4 000 m 以上的高山上进行。

五、获诺贝尔物理学奖的射电天文发现

(一) 宇宙背景辐射的发现

1964—1965 年，美国贝尔电话实验室的彭齐亚斯(A. A. Penzias)和威尔逊(R. W. Wilson)合作，将一台口径 6.1 m 的角锥状喇叭天线改造成一台能测量辐射绝对强度的射电望远镜(见图 3-21)。

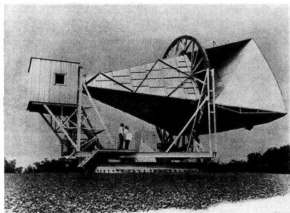


图 3-21 彭齐亚斯和威尔逊用于发现微波背景辐射的射电设备

他们在工作频率 4 080 MHz(工作波长 7.35 cm)进行探测，意外地发现天空背景始终存在着相当于(3.5±1.0)K 天线温度的剩余辐射，而且发现该辐射又是各向同性、无偏振、无季节变化的。这一辐射是在微波波段(波长从 1 mm～99 cm)上发出的，故称微波背景辐射。由于人们认证它是宇宙大爆炸留存至今的产物，故又称宇宙背景辐射。因这一发现，彭齐亚斯和威尔逊荣获 1978 年诺贝尔物理学奖。经后人进一步的测量和订正，该辐射只相当于 2.7 K 的黑体辐射。

（二）射电脉冲星的发现

1964 年，英国卡文迪许实验室的休伊什(A. Hewish)提出利用致密射电源的行星际闪烁效应来探测这种射电源角直径的方法，所谓行星际闪烁是指太阳风在行星际空间吹动会使角直径很小的射电源发生 0.1 s 量级的闪烁。为此，他主持建造了一个有 2 048 个(16 排，每排 128 个)偶极子天线的天线阵，其工作频率为 81 MHz(工作波长 3.7 m)，因工作在米波波段，天线阵的精度要求不高，造价也较低(见图 3-22)。配合特定的接收系统，该天线阵所构成的射电望远镜的时间分辨率很高。1967 年该望远镜投入运行后，由他的女博士研究生贝尔(S. J. Bell)十分细心地从事实际探测和资料分析工作。该年 10 月她意外地发现狐狸座方向有一个射电源以 1.337 s 的极精确周期脉冲式地辐射着电磁波。11 月 28 日，她又用更灵敏的记录装置获得了该射电源的更清晰的脉冲信号，从而导致了第一个射电脉冲星的发现。

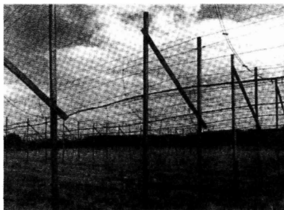
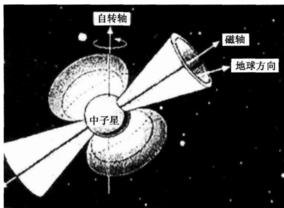


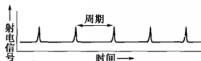
图 3-22　休伊什主持建造的射电天线阵

射电脉冲星发现后，它被认证为是快速自转的磁中子星。图 3-23 是这种中子星模型示意图。中子星有极强的磁场，其电磁辐射被约束沿着磁极冠区域发出。中子星的自转轴往往与磁轴不一致，而如果地球正好位于中子星自转过程中某一时刻磁极冠区域的张

角内，该中子星就会像探照灯那样每自转一周扫过地球一次。由于射电脉冲星的发现，休伊什荣获1974年诺贝尔物理学奖，遗憾的是第一发现者贝尔小姐竟未能同时获奖。



(a)快速自转的磁中子星



(b)地球上接收到的脉冲信号

图3-23 中子星模型

（三）引力波存在的间接证实

约1973年，美国马萨诸塞大学的泰勒(J. H. Taylor)提出了一个利用阿雷西博305 m口径的固定球面射电望远镜进行射电脉冲星巡天的计划，为此他还研制了一台接收机。他的研究生赫尔斯(R. A. Hulse)把这一计划选为自己博士论文的课题，并在巡天工作中发现了40颗新的射电脉冲星，其中有一颗周期仅5.9×10^{-2} s的PSR1913+16使他很感意外，原来它是一颗由双中子星构成的射电脉冲星。爱因斯坦(A. Einstein)创立广义相对论时曾预言，当一个大质量物体加速运动时，将会产生一种极微弱的波态扰动即引力波，但因引力波极其微弱，该预言一直未得到证实。赫尔斯发现的脉冲双星PSR1913+16两子星互相绕转的椭圆轨道偏心率很大，这表明它们在轨道上运动的加速度很大，因而会产生较明显的引力波并进而使该双星系统损失能量，绕转周期逐渐变短。此后，泰勒和赫尔斯进行了多年的精密测量，于1978年宣布，该脉冲双星的轨道周期以每年75 μs的速率变短。这与根据广义相对论所做的理论计算相吻合，从而间接地证明

了引力波的存在。由于这项出色的工作，他们师生俩分享了1993年诺贝尔物理学奖。

第五节　空间天文探测

一、空间红外探测

20世纪70年代，人们用高空气球、飞机携带红外望远镜到地球上空开展红外探测。但是，最理想的方法是用火箭发射绕地球运转的红外望远镜到大气层外进行探测，这种探测必须让整套设备能长期保持致冷状态。1983年，美国、英国和荷兰发射了第一个能长时间处于致冷状态的红外探测卫星（简称IRAS），在液氦致冷的10个月中，其上的红外望远镜发现了50万个红外源，使当时已知红外源的总数增加了近百倍。1995年11月，欧洲空间局又发射了被命名为“红外空间天文台”（简称ISO）的红外天文卫星，在两年半的探测中，发现了1 000多个活跃的红外星系，那里有大量的新恒星正在生成之中。

2003年8月，美国发射了用该国天文学家斯必泽（Jr. L. Spitzer）的姓氏命名的斯必泽空间红外望远镜（见图3-24），主镜的口径为85 cm。它与地球同步绕太阳运行，因而可以始终躲在地球的阴影中绕太阳公转，免遭太阳的直接照射，从而大大减少用于致冷的液氦的消耗。该望远镜直至2009年还在运行中，正在为探测深空中遥远的星系、探测银河系中恒星不同演化阶段的尘埃盘、寻找太阳系外绕别的恒星公转的行星等课题作出了贡献。

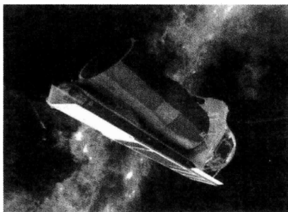


图3-24　斯必泽空间红外望远镜

2009年5月14日，欧洲空间局发射了口径3.5 m的红外空间望远镜，它以英国著名天文学家赫歇尔(W. Herschel)的姓氏命名，称为“赫歇尔红外空间望远镜”。它将对宇宙早期星系的起源和演化等课题进行深入的探测。

一项与空间红外探测、空间射电探测都有关系的重要工作是宇宙背景辐射探测器(简称COBE)的发射。按照黑体谱的理论曲线，2.7 K宇宙背景辐射的极大值应在波长1 mm附近，但1965年彭齐亚斯和威尔逊发现宇宙背景辐射时使用的工作波长却是7.35 cm，此后不少人也往往在射电波的厘米波段和分米波段证实宇宙背景辐射具有黑体辐射的特性，他们的工作都远离1 mm波长处。为了探索十分之几毫米至毫米波段的宇宙背景辐射是否与黑体辐射相吻合，以便证实宇宙背景辐射确实是宇宙大爆炸的“余烬”，美国天文学家斯穆特(G. F. Smoot)和马瑟(J. C. Mather)向美国国家航空航天局一再倡议发射COBE，在倡议获批准后，他们两人还分别研制了远红外探测和毫米波射电探测的设备。1989年，COBE发射升空后所进行的远红外探测和毫米波射电探测表明，宇宙背景辐射与绝对温度(2.726±0.010)K的黑体辐射精确吻合。1992年4月，他们还发现了宇宙背景辐射存在着温度起伏的相对比例达百万分之几的各向异性。按照大爆炸宇宙学，正是这种微小温度起伏的“种子”作用，才演化出当今的恒星、星系以及大尺度的宇宙结构。他们的发现强有力地支持了大爆炸宇宙学，也开了精确宇宙学的先河，因此两人共享2006年度诺贝尔物理学奖。

二、空间紫外探测

1968年12月和1972年8月，美国相继发射了“轨道天文台”2号和“轨道天文台”3号，后者因发射时正逢哥白尼诞辰500周年又称哥白尼卫星。这两颗卫星运行8年，前者发现了5 000多颗强紫外辐射天体，1973年获得了第一份紫外巡天星表，后者获得了许多紫外星、星际云和星际分子的光谱，它们的工作开创了紫外天文探测的新纪元。

1978年，美国航空航天局与欧洲空间局共同发射了“国际紫外探险者”号卫星；20世纪90年代，美国先后发射了一颗极远紫外探测卫星和一颗远紫外光谱探测卫星，获得了大量各种天体的紫外测光和紫外光谱资料；2003年4月，美国又发射了称为“星系演化探测器”的紫外空间望远镜，此后几年中它探测到宇宙中数十个诞生不久的年轻星系，还探测到牧夫座中40亿光年外的一个椭圆星系里，有一个巨大的黑洞正在吞噬一颗恒星。

三、空间X射线探测

X射线是能量约为0.12～600 keV(约相当于波长10～0.002 nm)的高能光子。由

于地球大气的强烈吸收，对天体X射线辐射的探测必须到地球大气层外进行。1970—1977年，美国与欧洲发射了多个X射线探测卫星，发现了第一个黑洞的候选者天鹅座X-1，发现了宇宙X射线爆发(宇宙中某X射线源辐射突然显著增强)，还发现了一千几百个X射线源等。但是，这些X射线探测卫星还存在一个重要缺陷，即其中所使用的盖革计数器等X射线辐射探测器，不得不依赖前面添加的各种准直器(只让来自某一方向的X射线通过的一系列复杂的挡板系统)，它们探测X射线源的方向性较差，而且不能成像。为了根本改变这种情况，美国天文学家贾科尼(R. Giacconi)等人进行了深入的探讨。他们发现，虽然X射线既不能被透镜折射也不能被反射镜反射，但对于光子能量小于12 keV(电磁波波长约长于0.1 nm)的软X射线而言，在非常倾斜的掠射角下却会产生全反射。利用这一原理，20世纪70年代中期他们研制成掠射X射线望远镜。1978年11月13日，美国发射了"高能天文台"2号，为纪念爱因斯坦诞生100周年，该卫星被命名为爱因斯坦X射线天文台，在其上首次安装贾科尼等人研制的掠射X射线望远镜。该望远镜有4层内外套着的环组成，其中最外层环的口径为58 cm，4层环中每层环圈上都有一组特定的抛物面镜和双曲面镜，利用先后两次全反射使收集到的X射线聚焦于同一焦点，最后获得天体的X射线像(见图3-25)。

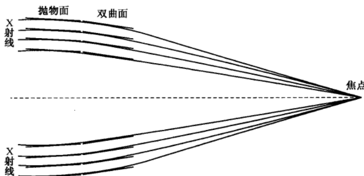


图3-25　掠射X射线望远镜成像的原理

1990年6月1日，德国、美国和英国联合发射了伦琴X射线天文卫星，其上有两架口径分别为84 cm和57 cm的掠射X射线望远镜，在此后8年多的探测中，共发现了10万多个X射线源，使发现的X射线源的总数一下子扩充了20倍。

在贾科尼的筹划和一再倡议下，美国还在1999年7月23日发射了又一个X射线天文台，为纪念美籍印度天体物理学家钱德拉塞卡(S. Chandrasekhar)，该台被命名为钱德拉X射线天文台，它长达11.8 m，其主体是一台可以使大面积的X射线聚焦成像的大型掠射X射线望远镜，它的成像质量极佳，因而可以探测到遥远的宇宙深处。钱德拉X射

线天文台在它的太阳能电池帆板展开后很像一只遨游在太空中的大蜻蜓(见图 3-26)。

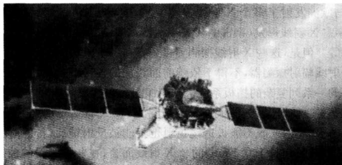


图 3-26 钱德拉 X 射线天文台

在 X 射线天文学发展的全过程中,美国天文学家贾科尼起了极其重要的作用,他是 X 射线天文学的主要奠基者,是第一台掠射 X 射线望远镜的主要研制者,又是发射爱因斯坦 X 射线天文台和钱德拉 X 射线天文台的主要筹划者和倡导者,正是由于在这一领域中的卓越贡献,他获得了 2002 年度的诺贝尔物理学奖。

四、空间 γ 射线探测

光子能量大于 600 keV(波长约短于 0.002 nm)的电磁波称为 γ 射线,但实际上它与光子能量在 10～600 keV 的硬 X 射线之间没有明确的分界,当使用空间 X 射线探测设备进行探测时,往往探测到的光子能量大于 600 keV 的 γ 射线也被视为硬 X 射线,而当使用空间 γ 射线探测设备进行探测时,往往探测到的光子能量小于 600 keV 的硬 X 射线也被视为 γ 射线,其间约有 1 个数量级上下的不确定性。

1972 年 11 月,美国发射了"小型天文卫星"2 号(简称 SAS-2),其上装有一台灵敏的 γ 射线探测器火花室,它能让进入该室的高能 γ 射线光子产生正负电子对,因而通过检测这些电子对得知接收到多少个 γ 射线光子。在该卫星 7 个月的工作期间,共记录到约 8 000 个 γ 射线光子,还发现了 4 颗 γ 射线脉冲星。所谓 γ 射线脉冲星是一种在 γ 射线波段发出脉冲辐射的脉冲星。1975 年 8 月,欧洲空间局发射了"宇宙线探测卫星 B"(简称 COS-B)在其 7 年工作期间探测到 10 万多个 γ 射线光子,而且也发现了几颗 γ 射线脉冲星。

1973 年,克莱比塞得(R. W. Klebesade)和斯特朗(I. B. Strong)根据美国在 1970 年 4 月发射的核爆炸检测卫星"维拉"11 号和"维拉"12 号的探测资料,发现了宇宙 γ 射线爆发,这是宇宙中 γ 射线源的一种短暂的猛烈爆发,是 20 世纪 70 年代天体物理学的

重大发现之一。

1991 年 4 月，美国发射了以物理学家康普顿(A. H. Compton)的姓氏命名的康普顿γ射线天文台，它是第一个可以对整个天空进行测绘的综合性γ射线探测卫星。在长达 9 年多的工作期间，它探测到了包括γ射线脉冲星在内的 400 个γ射线源，发现了 2 500 个宇宙γ射线爆发。还发现宇宙γ射线爆发在全天各个方向上是均匀分布的。对宇宙γ射线爆发的一项重要研究是，设法对这种源爆发之后在 X 射线至射电波段进行了余辉的探测。为此必须能对宇宙γ射线爆发源迅速定位，此事在 1996 年以前尚未能做到，直到 1997 年荷兰和意大利联合发射了贝普·萨克斯(Bepp SAX)卫星，才首次做到了能为宇宙γ射线爆发源即时定位，这项进展极大地推动了宇宙γ射线爆发和高能天体物理学的研究。

五、光学波段的空间观测

光学波段的天文观测尽管可以在地面上进行，但在地面上，满天云层使光学观测无法进行；白天即使是晴空万里，大气散射使天空变成蔚蓝色，星星全都隐匿不见，这时除观测太阳外，任何其他天体的光学观测依然无法进行；晴夜虽然可以观测星星了，但大气闪烁大大降低了天体的空间分辨率，大气色散则又给天体的光谱观测带来额外误差。凡此种种，都表明地面光学观测存在着很大的局限性。为了克服上述种种局限性，1990 年 4 月 24 日，美国用航天飞机将一台天文光学望远镜送入太空，这便是以美国著名天文学家哈勃(E. P. Hubble)的姓氏命名的哈勃空间望远镜(简称 HST)。HST 在距地面 600 多千米处绕地球运转，其光学系统由口径 2.4 m、中间挖有圆孔的凹双曲面主镜和口径仅 0.3 m 的凸双曲面副镜组成，这一光学系统很类似于本章第二节中介绍的卡塞格林系统，但它几乎不存在任何像差，成像质量极佳。该光学系统放在长 13 m、直径 4.3 m 的镜筒中，由于它在太空中处于失重状态，因此无需任何支架系统。HST 在太空中摆脱了地球大气的各种干扰，可以不分昼夜、不间断地连续工作(见图 3-27)。它的高分辨率的电子照相机和摄谱仪可以在波长 0.11～1.10 μm 范围内工作，这一范围不仅包括整个可见光波段，而且也包括部分红外光和部分紫外光

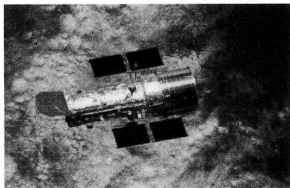


图 3-27　哈勃空间望远镜

波段；由于摆脱了地球大气层的影响，它的分辨角小于0.06″，比地面光学观测的分辨角（约1″）小一个多数量级。HST能自动获得天体的图像和光谱信息，并送入比它轨道更高的同步通信卫星，然后再下传到地面站送达美国空间望远镜研究所。

HST升空近20年来，它发现了某些太阳系外别的恒星的行星系统；拍摄到某些星云中正在生成恒星的壮丽景象；探测到类星体和活动星系核与星系中央巨型黑洞间的密切联系；拍摄到许多极其遥远因而其生成年代也极早的星系的照片；探测到较大星系在吞并较小星系的过程中逐渐成长壮大；获得了我们的宇宙年龄为137亿年的许多证据。总之，HST所获得的探测成果极其丰硕。

第四章　地球和月球

地球是太阳系八大行星之一，按离太阳由近及远的次序排列为第三颗。它有一个天然卫星月球，两者组成了一个天体系统——地月系。

本章前四节介绍地球，后四节介绍月球，但后者中第六节所阐述的日食和月食则是地球运动和月球运动的共同结果。

第一节　固体地球与海洋

一、基本情况

地球(见彩图3)可分为固体地球、水圈和大气圈三大部分。固体地球虽有高山、深渊，表面凹凸不平，但它基本上是一个赤道半径大于极半径的旋转椭球体，也许有点像橘子的形状。然而，它的赤道半径 a 为 6 378.136 km，极半径 b 为 6 356.753 km，地球的椭率 $(a-b)/a=1/298.257$，约为 0.34%，这一微小的椭率不足以显示橘子状。也许从太空中很远的地方看，地球不像一个橘子而更像一个球形物体。

谈到地球的形状，还得涉及到地球上的海洋。海洋是地球上水圈的最主要部分，海洋中水的体积约占地球上全部水的体积的 97%。地球表面陆地的面积只占 29%，而海洋的面积却占 71%，所以谈到地球的形状必须涉及到大地水准面的概念。大地水准面是一个假想的表面，即把占地球表面 71%的海平面延伸穿透大陆构成的一个封闭曲面，它也是地球重力在海平面处的等势面。它与上面提及的可把地球视为旋转椭球体的旋转椭球面并不重合，而是有微小的差异(见图 4-1)。

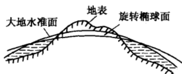


图 4-1　大地水准面与旋转椭球面示意图(图中两者的差异有所夸大)

包括固体地球和海洋在内的地球体积为 $1.0832\times10^{12}\text{km}^3$,质量为 $5.9737\times10^{24}\text{kg}$,由此可以算出其密度为 $5.5148\times10^3\text{kg/m}^3$。地球表面重力加速度平均为 $9.80\ \text{m/s}^2$,但不同纬度处略有不同,赤道处只有 $9.78\ \text{m/s}^2$,而两极附近高达 $9.83\ \text{m/s}^2$。地球表面逃逸速度(地球上的物体脱离地球引力场一去不复返所需的最小速度)为 11.2 km/s。

二、地壳的运动

地壳是固体地球的最外层,它的外部与广阔的海洋以及大气层相连,下部则有一个没有厚度的间断面与固体地球中的地幔相隔离。在 20 世纪早期以前,人们普遍认为地壳的运动主要表现为垂直运动,即地面的隆起和沉降,地壳的水平运动是十分次要的。1912 年,德国科学家魏格纳(A. L. Wegener)提出了大陆漂移说;1915 年,他出版了著名著作《海陆的起源》,全面论述了这一学说,并给出了许多证据。他认为,距今 2.25 亿年前,地球上存在着一个彼此相连的庞大的联合古陆——泛大陆,它的周围是连成整片的超级大洋——泛大洋,后来这块泛大陆向四处分裂漂移,例如美洲大陆向西漂移,结果中间形成了大西洋,泛大陆别的部分也向别的方向漂移,最后才形成了当今的世界(见图 4-2)。魏格纳的学说,受到当时学术界的普遍反对,一直沉寂近半个世纪,直到 20 世纪 60 年代,由于海洋学和地球物理学方面获得了大量有利于大陆漂移说的证据,这一学说才逐渐为人们所公认。

20 世纪 60 年代前期,美国两位海洋地质学家赫斯(H. H. Hess)和迪茨(R. S. Dietz)相继提出海底扩张假说。该假说认为地壳和它下面的地幔顶部是厚度 70～100 km 的岩石层,而在这之下的地幔中,热流体物质在对流运动,当两股相向的对流物质迎头相遇时,会冲破上面的岩石层,深处的岩浆会从隆起海岭的裂口中流出,不断充填周围,形成新的海底,而老的海底则以每年几厘米的速度向两侧扩张。结果海洋底部的地质状况十分“年轻”,不足 2 亿年海洋底部就更新一次。海底扩张假说已得到后来研究者的证实。

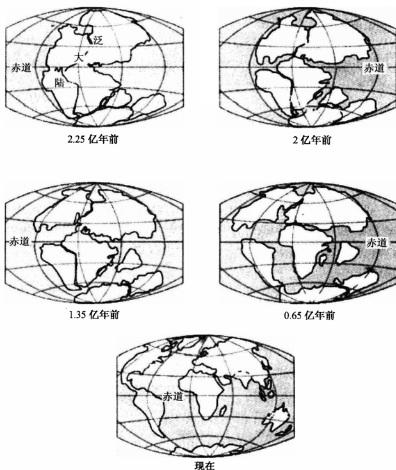


图 4-2　魏格纳大陆漂移说揭示的不同时期的大陆分布

在大陆漂移、海底扩张等假说的基础上，20 世纪 60 年代末期诞生了板块构造学说。这一学说认为地球的岩石层并非一整块，而是由若干个相对运动着的板块所构成。全球岩石层可以划分为欧亚板块、美洲板块（包括北美洲板块和南美洲板块）、非洲板块、太平洋板块、印度-澳大利亚板块和南极板块六大板块，各大板块内有的又可细分为若干个小板块。板块分界处是大地构造活动比较剧烈的地带，例如在印度-澳大利亚板块和欧亚板块之间，由于前者对后者的挤压作用，处于两个板块分界线上喜马拉雅山脉和青藏高原过去不断抬升；今后还会继续抬升。

三、地幔和地核

固体地球的内部结构除了前文已涉及的最外层的地壳外，其内还有地幔和地核。对地幔和地核的了解主要来自于对地震波的研究。

地壳的厚度平均只有 33 km，但差别甚大，我国青藏高原地壳的厚度可达 65 km，但海洋地壳往往只有 5～8 km。在地球表面之下 33 km 处的地壳与地幔之间存在着一个地震波波速的间断面，该间断面是由前南斯拉夫学者莫霍洛维奇(A. Mohorovičić)在 1909 年首先发现的，因此用他的姓氏命名，称为莫霍洛维奇间断面，简称莫霍面，这一间断面正是地壳与地幔的分界线。此外，在离地面 2.9×10^3 km 深处，也存在着一个地震波波速的间断面，这一间断面是由后来加入美国籍的德国地球物理学家古登堡(B. Gutenberg)在 1914 年率先发现的，而且由于他的老师德国地球物理学家维舍特(E. Wiechert)对这一发现也有所贡献，因此往往称为古登堡-维舍特间断面。这一间断面正好是地幔与地核之间的分界线。

地幔往往分为上地幔和下地幔，从地下 33 km 莫霍面之下直至离地面 1 000 km 深度处为上地幔，而从这以下直至离地面 2.9×10^3 km 深的古登堡-维舍特间断面处为下地幔。地幔物质主要是岩石，但由于它们在不同深度处于 1.3×10^3℃～4.0×10^3℃的不同高温和很大的压力下，往往具有一定的可塑性，它有点像麦芽糖糖块，猛敲起来很脆很容易断裂，然而在长期持续力作用下却可以弯曲扭结。特别是在上地幔上部，由于受到的压力较小，其熔点较低，高温下的岩石甚至会以岩浆的形态从薄弱的地壳表层喷出。

从离地面 2.9×10^3 km 深的古登堡-维舍特间断面直至地心称为地核。地核中主要成分是铁、镍等重元素。地核分为外地核和内地核，两者约以离地球表面 5.0×10^3 km 深处为界。在外地核中由于温度稍高于其中物质的熔点，所以物质呈流体状态；在内地核中，由于压力迅速升高，物质的熔点在高压下升高很快，那里物质的温度尚未达到熔点，所以内核是固态的。在地球中心，温度高达 6.0×10^3℃，其压力可能超过 370 万个标准大气压。图 4－3 给出了一幅地球

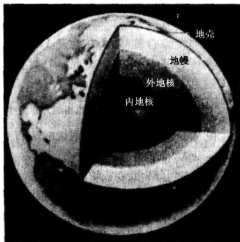


图 4－3 地球内部结构

内部结构的示意图。

第二节 地球大气和水的循环

一、地球大气的组成

地球大气的总质量约为 5.136×10^{18} kg，略小于地球总质量的百万分之一。对于低层大气中的干、洁空气而言，氮、氧、氩和二氧化碳的质量分别占总质量的 75.51%，23.14%，1.29%和 0.05%；而这四者的体积则分别占总体积的 78.08%，20.95%，0.934%和 0.032%。除这四者之外，其余还有氖、氦、氪、甲烷、氢、一氧化碳、氙、臭氧和氡等，它们合起来的质量百分比或体积百分比均不足地球大气的 0.01%。上述干、洁空气既不包括水汽，也不包括微尘。空气中的水汽变化很大，夏季湿热空气中，水汽的含量可高达 4%，而冬季的干、寒空气中其含量可下降到 0.01%。至于微尘所占的比例通常虽然低于湿热空气中水汽的含量，但往往因地而异，难于作出严格界定。

二、地球大气的分层

最常用的是以大气温度随高度的变化来分层，如图 4－4 所示。紧靠地表的低层大气处于高度对流状态，故称对流层。狂风暴雨、大雪纷飞等各种气象现象都在这一层出现。对流层顶的位置因纬度和季节而异，赤道地区离地球表面高而两极地区离地球表面较低，且夏季较高而冬季较低。图 4－4 中将对流层顶平均取在离地面 12 km 的高空。对流层是大气圈中最薄的一层，但该层中大气最浓密，占总质量 80%的地球大气位于这一层中。在这一层中，温度随高度的增加而降低，平均每上升 150 m，温度约下降 1℃，到达对流层顶时，温度约在－55℃左右。

在对流层上面的一层是平流层。它的高度约离地面 12～50 km。这一层的大气主要是平流运动，故称平流层。大气中的臭氧（O_3）大部分分布在这一层中，而且臭氧浓度最大处位于这层中离地面 20～30 km 的高空。臭氧吸收了大部分太阳光中对生命有害的紫外线，保护了人体的健康。由于臭氧吸收太阳的紫外辐射，导致这一层中的温度随高度缓慢上升。平流层底，温度只有－55℃，而到了平流层顶，温度则上升到－10℃～20℃。平流层以往又称同温层，但这一称呼有点名不副实，现在已较少使用。

平流层之上的一层称为中间层，这层离地面的高度约 50～85 km，其温度随高度而下降，到中间层顶时，温度降至－80℃，可以说降到了最低点。

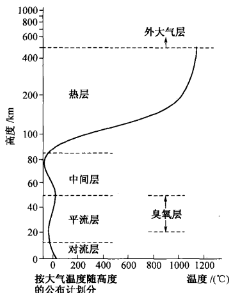


图 4-4 按温度与离地面高度的变化对地球大气的分层

中间层之上是热层，它是大气温度随离地面高度分层的最高一层，其范围约 85～500 km。在这一层中的大气由于吸收太阳的远紫外辐射（波长短于 120 nm 的紫外辐射）和 X 射线辐射而变热，其温度从中间层顶的 -80℃起，先是快速升温，后又慢速升温，到热层顶时已升至 1.1×10^3℃。

热层之外是外大气层，大气十分稀簿，原子数的密度已下降到 10^{13} 个每立方米以下，比海平面处原子数的密度已下降 1 万亿倍。外大气层延伸很远，甚至远到离地球表面 6.0×10^4 km 处，那里的大气越来越稀簿，其主要成分是氢和氦，它们会受到太阳中氢原子的波长 121.6 nm 的谱线的激发而产生紫外辐射，所形成的微弱的地球气晕被称为地冕。

对地球大气的另一种分层方法是按大气的电离程度来分。从地球表面到高空 60 km 处，其中的分子和原子都未被电离，处于中性状态，故称为中性层。而在这之上则称为电离层。电离层还可细分为 D 层（高度 60～90 km）、E 层（高度 90～140 km）、F_1 层（高度 140～200 km）和 F_2 层（高度 250～500 km，其中约 300 km 处电子密度最大），它们的位置和电离情况往往会随不同年份、不同季节以及每天的不同时刻（特别是白昼和夜晚）而变化。电离层的存在对地球上的短波无线电通信有重要作用。

三、地球上的水循环

固体地球、大气圈和水圈并列为地球上互相依存的三大部分。其中水圈是地球表层

水体的总称，包括海洋、南极冰盖、冰川、河流、湖泊、地下水和大气中的水。地球上水圈的最大特点是实现了动态平衡的水循环，其中最大规模的循环发生在海洋、大气与陆地之间。射到地球表面的太阳能中的 1/3 用于蒸发海水，海水蒸发出的水汽进入大气中，凝结为云并随大气运动漂浮到大陆上空，再通过下雨或下雪降落到地面上，然后又经小河、大江使水回归海洋。在这种水循环的过程中，它滋润大地、补充地下水，还使陆地上的动植物和我们人类获得淡水供应，使生命得以一代代延续下去。

地球上动态平衡的水循环之所以能得以实现，与大气圈、固体地球都有密切的关系。地球上有足够浓密的大气圈，进入大气圈中的水汽除下落为雨雪外，很难逸散到太空中去；之所以很难逸散，乃是由于固体地球的恰当的质量和足够大的引力场所起的保障作用。

第三节　地球磁层与地球辐射带

一、地球磁场

地球磁场与条形磁石的偶极磁场很相似，一端是南磁极，另一端是北磁极（见图 4－5）。但地磁极与地球自转轴的南北极并不一致，经测定目前约有 11.5°的交角，且北磁极偏向加拿大方向。地球磁场不对称于地心，而是偏离地心南约 460 km 处。地球磁场的强度在磁极处约为 6×10^{-5}T，而在磁赤道处正好是此值的一半。从长时期来看，地球磁场还会产生极性倒转，即南磁极变为北磁极，而北磁极变为南磁极。据研究，在过去的 350 万年中，至少已发生过 9 次这样的极性倒转。至于产生极性倒转的原因，目前还不清楚。

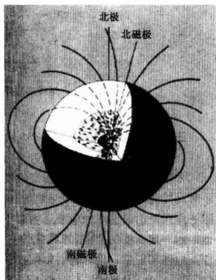


图 4－5　地球偶极磁场

二、地球磁层

太阳的外层大气日冕（见第六章）在不断地发出带负电荷的电子以及带正电荷的质子、重离子等高温带电粒子流，这种粒子流每立

方厘米中的粒子数甚至不足 10 个，其中带正电荷的粒子数和带负电荷的粒子数基本相等，是一种等离子体流，在太阳系空间中由太阳向外行进的速度高达 400～800 km/s，称之为太阳风。当太阳风吹向地球偶极磁场时，地磁场的磁感线都向后弯曲，而该磁场朝太阳方向的最前沿形成一个包层，向背着太阳方向延伸则形如彗星的彗尾形状。这个被太阳风包围的、形如彗星状的地磁场区域称之为地球磁层（见图 4－6）。该磁层起始于地球表面上空 600～1 000 km 处，向空间延伸到太阳风动能密度与地磁场能密度相平衡的曲面上，这一曲面是地球磁层的边界，称为磁层顶。在朝向太阳的一面，磁层顶离地心的距离约为 8～11 个地球半径；太阳活动激烈时，太阳风增强，朝着太阳那一面磁层顶离地心的距离被压缩到 5～7 个地球半径；在背向太阳那一面，太阳风无法对地磁场施以任何有效压力，地球磁层在空间可以延伸到数百甚至 1 000 个地球半径之外，从而形成地球磁层的磁尾。磁尾的边界近似圆柱形，其半径约 20 个地球半径。太阳风与地球磁场相遇的前沿位置处，在地球周围会形成一个弓形激波波阵面，该波阵面与地球磁层之间的过渡区叫磁鞘，其厚度约 3～4 个地球半径。

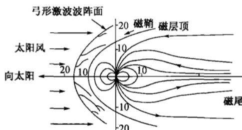


图 4－6 地球磁层示意图（图中数字均以地球半径为单位）

三、地球辐射带

太阳风、宇宙线（来自宇宙空间的高能质子、高能氦等元素的原子核、高能电子、中微子和高能光子构成的射流）与地球高层大气相互作用产生大量高能带电粒子，它们在地磁场作用下沿磁感线做螺旋运动时不断辐射电磁波，同时又被地球磁层约束在一定磁纬地区和一定高度的上空，就像在那里建起了高能带电粒子的“俘虏营”。这样的“俘虏营”便是地球辐射带。地球辐射带的存在先被理论所预言，1958 年才被美国天文学家范爱伦（J. A. Van Allen）用“探险者 1 号”卫星探测所发现，所以又称范爱伦带。

地球辐射带主要有内辐射带和外辐射带两个，它们分别在低磁纬和中磁纬高空环绕地球，通过南北磁极的竖切面均呈月牙状（见图 4－7）。内辐射带主要集中能量为

50 MeV的高能质子和能量大于 30 MeV 的高能电子，离地面高度约 1～2 个地球半径，范围限于地球磁纬±40°之间；外辐射带主要集中高能电子，离地面高度约 3.5～11 地球半径，范围限于地球磁纬±60°之间。实际上，带电粒子分布在整个地球磁场内，并不存在辐射带的严格边界，上面给出的范围只是相关的高能粒子最密集的区域罢了。此外，大约在 21 世纪初，人们又发现了比上述两个辐射带更靠近地球的第三辐射带，那里是来自太阳系之外的高能氧、高能氮和高能氖离子的"俘虏营"。

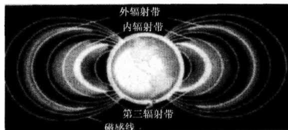


图 4-7　地球辐射带

第四节　地球的极移、岁差、章动和潮汐

绕轴自转和绕太阳的公转是地球最重要的两种运动，这两种运动和所产生的影响在本书第一章和第二章中已作过阐述，本节讨论的则是地球的另外几种运动，即自转轴在地球本体内的变动、自转轴的空间运动和自转速率的变化，这几种运动便是地球的极移、岁差和章动。此外，还将讨论和地球形变有关的潮汐。

一、地球的极移

地球自转轴在地球本体内并不是永远不变的，它会随时间而出现微小的变化，从而使地球的南极和北极在地面上发生微小的位移，它被称为极移。早在 1765 年，瑞士著名科学家欧拉(L. Euler)假定地球是一个旋转椭球体的刚体，推算出若地球自转轴稍微偏离惯性主轴，则地球自转轴将以 10 个月的周期绕其惯性主轴做自由摆动，它被称为欧拉周期，这是对地球自转轴存在极移的最早预言。

极移的存在被天文实测工作证实之后不久，美国天文学家钱德勒(S. C. Chandler)在 1891 年发现，极移中存在着一个约 14 个月的非刚体地球的自由摆动周期。后人称该周期为钱德勒周期，并指出它实际上就是欧拉在 1765 年所预言的刚体地球的自由摆动

周期，只是由于地球并非刚体以及海洋的流动性而使欧拉周期延长为钱德勒周期了。

极移的值很小，它通常不会超过 0.4″，相当于地球自转轴的北极或南极在地面上的位置只在一个篮球场的范围内移动，但在精确的天文测量中依然需要将它测定出来，并及时公布地极坐标随时间的变化情况。

二、岁差和章动

地球是一个椭球体，位于黄道上的太阳和位于黄道两侧不远处的月球对地球赤道隆起部分的引力会使地球赤道面产生一种向黄道面重合的转动效应，但地球又在不停地自转着，自转运动的惯性使赤道面和黄道面的夹角不会改变，结果造成地球自转轴绕垂直于黄道面的轴线做进动，这种情况与地面上斜着自转的陀螺必然产生进动很类似。地球自转轴做进动时，所指向的天极方向与黄极方向的夹角始终等于黄赤交角 23°26′，进动方向则和地球自转方向相反（见图 4－8），进动周期为 25 800 年。这一现象是岁差中主要部分的日月岁差所引起的。

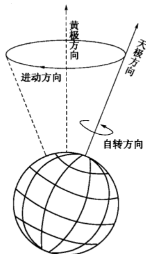


图 4－8　地球自转轴的进动

地球很像一个缓慢进动的大陀螺，这种进动导致北天极在恒星间的位置在不断变动：目前北极星是小熊座 α；到公元 7000 年时，北极星将是仙王座 α；而再到公元 13000 年时，北天极离织女星（天琴座 α）很近，到那时织女星便变成更辉煌灿烂的北极星了（见图 4－9）。

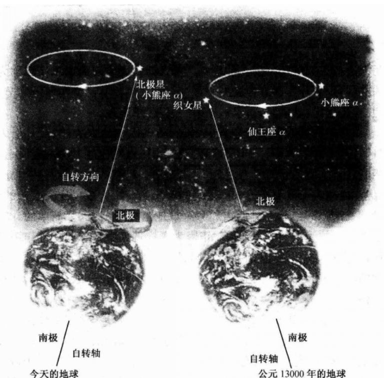


图 4-9　地球自转轴进动引起的北极星的变迁

岁差引起的地轴进动造成黄道与赤道的交点位置发生变化，结果春分点在赤道上每年向西退移 50.24″。这一数值也称为分点岁差。

月球与太阳不同，它并不在黄道平面上对地球赤道的隆起部分施加影响，而是在白道平面（与黄道平面相交 5°9′）上对该隆起部分施加影响。此外，月球、太阳到地球的距离也有周期性变化。这些都会引起天极和春分点更复杂的运动。可以用一些振幅甚小的短周期变化来表示这类运动，称为章动。章动中最主要的一项周期为 18.6 年，振幅约为 9.2″，它是由黄道与白道的交点（简称黄白交点）以 18.6 年的周期性位移引起的（见本章第五节之四）。这项章动使北天极 P_0 的进动轨迹变成了绕北黄极 K 振幅为 9.2″的波浪形曲线（见图 4-10）。

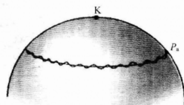


图 4-10　由于章动的叠加，北天极 P_0 进动的轨迹变成了绕北黄极 K 的波浪形曲线

三、潮汐

潮汐是海边的人们最常见的一种现象。古人把白天出现的海水高涨称为“潮”，晚上出现的海水高涨称为“汐”，两者合起来便是“潮汐”。潮汐有涨潮与落潮之分，涨潮时，海水涌向岸边，惊涛拍岸；落潮时，海水从岸边后退，沙滩毕露。

潮汐是日、月对海水的吸引力造成的，但它不是简单地取决于日、月引力的大小，而是取决于日、月起潮力的大小。所谓起潮力，是指日、月对地球表面一定质量的海水与对地球中心相同质量物质之间的引力之差。研究表明，起潮力的大小虽然与施力天体的质量成正比，但却与施力天体与受力天体之间的距离的 3 次方成反比。太阳的质量虽然约为月球质量的 2 700 万倍，但月地距离却只有日地距离的 1/390。简单的计算表明，月球对海水的起潮力大约为太阳的 2.2 倍。正因为潮汐现象中月球起主导作用，所以海边的人们早已认识到海水的涨潮、落潮是以太阴日为周期的，所谓太阴日是指观测者所见到的月球连续两次上中天的时间间隔，约为 24 小时 50 分钟。一般在一个太阴日中有两次涨潮、两次落潮。

在一个朔望月中，会出现两次大潮，两次小潮。它们是怎样造成的呢？大潮和小潮实际上是一个朔望月中月球引起的潮汐和太阳引起的潮汐的一种综合效应，图 4－11 在整个地球完全被海洋所包围的近似假定下来讨论这个问题。该图上半图表明月球处于朔和望时，太阳的起潮力和月球的起潮力会互相叠加，于是产生大潮。该图下半图则是月球处于上弦和下弦的情况，这时月地方向和日地方向几乎互相垂直，月球起潮力所产生的潮，部分被太阳起潮力所产生的潮所抵消，于是产生小潮。在太阳、地球、月球处于其他相对位置时，所引起的潮则处于上述两种极端情况之间。

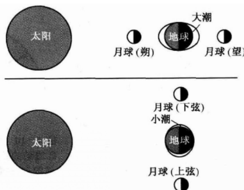


图 4－11 大潮（上图）和小潮（下图）的形成

由于地球上海洋面积占 71%，还有 29%被陆地所覆盖，而且陆地的形状和分布毫无规则、海岸线弯弯曲曲、海底形状高低不平、海水又有黏滞性，这些情况都使海潮的传播变得很复杂。通常，每天高潮的到来往往比月球上中天要晚一至几小时，大潮也要比每月的朔和望晚两三天。例如，我国钱塘江大潮不发生在农历每月十五日(望)，而是在农历每月十八日。

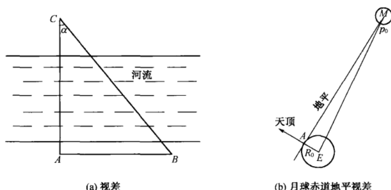
除海洋潮汐外，太阳和月球也会对地球大气和地壳产生潮汐作用，它们分别称为大气潮和固体潮，由于这两种潮比海洋潮弱得多，本书中不作介绍。

潮汐是地球自转的"减速闸"。经测定，由于潮汐摩擦，日长每经过 1 个世纪将增长 0.001 8 s。这一数字看起来很小，但若用亿年的时间尺度计算，其效应便十分明显。例如，若近似认为 4 亿年以来，地球自转一直在以这样的速度变慢，那么 4 亿年前地球自转一周仅需 22 h。古生物学家通过对古珊瑚化石生长线的研究，得出的结论是距今 3.7 亿年前，地球自转一周只需 21.9 h。上面两种不同的计算彼此吻合。如果时间再往前推算，那么地球自转速度就更快。

第五节　月球的运动

一、基本数据

天文学家测定天体距离往往使用视差的方法。什么叫视差呢？在地面上要测出河对面 C 点离 A 点的距离[见图 4-12(a)]，可在 A 点设立一条与 AC 垂直的长度已知的基线 AB，由于 $\angle BAC$ 为直角，所以只要从 B 点观测 C 点，求得 $\angle ABC$，于是 $\angle ACB=90°-\angle ABC$ 便可求得，此角称为 C 点看基线 AB 的视差 α，这一视差测得后，C 点离 A 点的距离也就测得了。对于月球，通常要测量的是赤道地平视差 p_0。在图 4-12(b)中，E 点为地球中心，A 点为地球赤道上一点，EA 为地球的赤道半径 R_0 且 EA 指向天顶方向，而月球中心 M 与 A 点的连线 MA 正好位于地平方向，即 $\angle EAM$ 为直角，于是 $\angle AME$ 即 p_0 便称为月球赤道地平视差。实际测量中因地心 E 无法到达，往往用地面上两处的测定进行换算，求得月球赤道地平视差 p_0。由于月球不断沿椭圆轨道绕地球转动，月地距离在不断变化，所以这样测出的 p_0 也在变化，于是天文学家进一步定义了月球平均赤道地平视差的概念，即当月球位于月地平均距离时所测得的月球赤道地平视差。这种测量视差的方法称为三角视差法。



(a) 视差　　(b) 月球赤道地平视差

图 4-12　视差和月球赤道地平视差的定义

现已测得月球平均赤道地平视差为 57′2.6″，据此可求得月地平均距离为 384 401 km。从月地平均距离处看到月球半径的张角为 15′32.6″，或月球的平均角直径为 31′5.2″。由此算出月球直径为 3 476 km，约为地球直径的 3/11。月球的质量为 7.35×10^{22} kg，约等于地球质量的 1/81.3。月球的平均密度为 3.34×10^3 kg/m^3，约相当于地球密度的 3/5。月球上的重力加速度为 1.62 m/s^2，约为地球表面重力加速度的 1/6。月球上逃逸速度为 2.4 km/s，仅为地球上逃逸速度的 1/5 左右。

二、月相与朔望月

月球自身不发光，它只能反射来自太阳的光，因而当太阳、月球、地球三者相对位置不同时，地球上看到的月球的被照亮部分就显示出不同的位相。在图 4-13 中，太阳光从右侧射来，月球绕地球转动的平面稍有倾斜，表示月球绕地球公转的白道平面与地球绕太阳公转的黄道平面约有 5°9′ 的交角。在图中位置 1 时，月球被太阳照亮部分完全背着地球，这种月相称为“朔”，它出现在农历每月初一。在图中位置 2 时，约在农历初三或初四的黄昏，蛾眉状的月球挂在西方的天空，被照亮的凸出部位朝向西方下落的太阳，这时的月相称为“蛾眉月”（见彩图 4）。在图中位置 3 时，大约在农历初八前后，月球西侧的半个月面被太阳照亮，这时的月相称为上弦。在图中位置 5 时，约在农历每月十五日，地球正好位于太阳和月球之间，这时整个观测者所见的月面都被太阳照亮，该月相称为“望”，又称“满月”。在图中位置 7 时，约在农历每月二十二日前后，月面的东侧那一半被太阳照亮，这时的月相称为“下弦”。在图中位置 4 时，它是上弦与望之间的大半个月面被照亮的状态，其中尚未丰满的部分是月面的东边缘，它被称为盈凸月。在图中位置 6 时，它是望与下弦之间大半个月面被照亮的状态，其中正在不断扩大黑暗区域的是月面的西边

缘，它称为亏凸月。在图中位置8时，月球再次呈现为蛾眉状，但其凸出部分朝向东方未升起的太阳，这时的月相称为“残月”。月球经过残月又将回到朔，再度进入新一轮的月相变化。

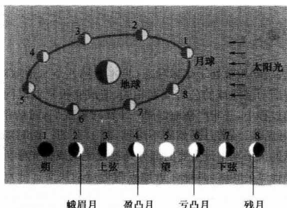


图4-13　月相变化示意图

天文学家往往用“月龄”来定量地表示月相，月龄以日为单位，将每月朔的时刻定为月龄等于0，而朔望月结束时定义月龄等于29.5。于是，上弦、望和下弦的月龄分别为7.4，14.8和22.1，但新月、盈凸月、亏凸月和残月因为在朔望月周期中没有确定的时刻，所以无法与明确的月龄相对应。然而，如果给出了某月某日某时刻的月龄值，天文学家立即可以知道对应的月相是什么情况，这说明月龄是朔望月中对月相的更精确的描述。

描述月相变化周期的量称为朔望月，它与恒星月的关系可以从图4-14中看出。图中，S点表示太阳位置，若当地球位于E_1点时，月球正好位于望月时的位置M_1点，E_1M_1的延伸指向背景恒星位置点A的方向；当地球从E_1点到点E_2时，月球已从M_1点到达M_2点，E_1M_1与E_2M_2平行，即此时E_2M_2的延伸依然指向背景恒星A点的方向，或者说相对于背景恒星而言，月球正好完整地绕地球转了一圈，这称之为经过一个恒星月。1恒星月等于27.321 66日，它是月球绕地球转动的真正的周期。但相对于太阳位置S点而言，月球还没有再次到达望月的位置，必须等地球到E_3点，即再转过$\angle E_2SE_3$，月球才能再次到望月的位置M_3点，这才经过

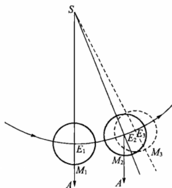


图4-14　朔望月与恒星月的关系

了一个朔望月。这说明朔望月是太阳、地球、月球从一种相对位置到下一次再回到这种相对位置的周期，即从一次朔到下一次朔，或从一次望到下一次望的周期。朔望月等于29.530 59 日。

三、月球的天平动

月球诞生早期，表层物质曾处于熔融状态（见本章第八节），地球对它的强大的起潮力使它的自转周期逐渐与绕地球的公转周期相同，造成它很早就以同一个面面对地球。但月球在绕地球转动过程中，并非严格地以同一个面对着我们，而是存在着晃动现象，它使41%的月面始终可见，41%的月面始终不可见，而18%的月面时隐时现，人们称之为月球的天平动。月球的天平动中最主要的部分是视天平动或称光学天平动。例如，由于月球在椭圆轨道上绕地球公转时，月球在近地点附近运动快而远地点附近运动慢，而月球的自转却是匀速的，这种不一致必然造成月球在东西方向上产生一种视摆动，这被称为月球的经天平动。经天平动的摆动幅度达7°54′，它是视天平动中最明显的一种。另一种视天平动则是南北方向上的一种视摆动，使月球绕地球公转时，人们有时较多地看到它的北极地区，有时则较多地看到它的南极地区，这种南北方向上的摆动幅度可达6°41′，它被称为纬天平动。还有一种是由于月球离我们较近，地球上不同地方的人或同一人来到地球上不同地方所看到的月面会略有不同，称为视差天平动，它只有1°左右。最后还有一种极其微小的摆动，它不是月球对地球的视摆动，而是因月球自转轴指向的微小变化而引起的月球本身的真实摆动，人们称之为物理天平动。它的数值极其微小，往往可以忽略不计，但在精密的月球激光测距等工作中则必须考虑它的影响。

四、月球轨道运动的复杂性

由于月球绕地球公转时，除地球对它的引力作用外，还受到太阳对它施加的引力影响、地球赤道隆起部分的额外引力影响、其他行星特别是大质量行星木星对它的引力影响等，使月球绕地球的轨道运动成为天体力学中最复杂的问题。月球轨道运动的复杂性表现在以下几方面：

① 不能简单地把地月系的运动看成是月球绕地球中心的运动。月球的质量为地球质量的1/81.3，相差并非特别悬殊。月球绕地球公转实际上应看成是地球和月球都在绕地月系的质心公转，不过这个质心在地球体内离地心距离 L 约 4 700 km 处（见图 4-15），即约为地球半径2/3的地方。虽然地球绕太阳公转也可以看成是两者都在绕公共质心转动，但由于太阳的质量是地球的33万倍，在这种情况下公共质心几乎就在太阳中

心，但地月系的情况却不能轻易简化为月球在绕地心公转。

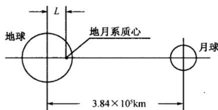


图 4-15　地月系的质心

② 月球椭圆轨道的形状在不断变化，它的偏心率最大时可达 1/15，最小时则只有 1/23。

③ 月球到地球的平均距离存在着长期变化，40 亿年前月球离地球的距离只有 1.1×10^5 km，目前则已达 3.84×10^5 km。

④ 拱线即月球椭圆轨道的长轴在 8.85 年内在白道面内旋转一周。

⑤ 黄白交角平均为 5°9′，但它又以 173 天的周期在 4°57′～5°19′的范围内不断变化。

⑥ 白道与黄道的升交点（月球在白道上从黄道南升至黄道北的交点）和降交点在 18.6 年中沿黄道西退一周，这造成月球不断摆动在黄道两侧，并引起上文中提到的章动现象。

月球绕地球的公转运动不仅有以上种种的复杂性，而且它在绕地球公转的同时还必须永远紧跟地球绕太阳运转。平均每绕地球公转 12.37 圈，也跟随地球绕太阳转动一周。由于日地距离是月地距离的 390 倍，从一位太空中的观测者看来，也许他很难发现月球绕地球的公转，他只看到月球也在绕太阳运转，而且绕太阳的运动轨道是永远凹向太阳的（见图 4-16），至多看到其运动曲线在地球绕太阳的轨道内外有微小的摆动而已。

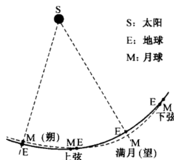


图 4-16　月球跟随地球的绕日轨道（虚曲线所示）永远凹向太阳

第六节 日食和月食

一、日食原理

日食发生在朔日即农历初一前后。日食通常分为日全食、日环食和日偏食三类，此外还有一种十分罕见的日食称之为日全环食，这种日食也可以看成并非新类型的日食，而只是一次日食中地球上不同地方的人分别看到日全食和日环食而已。日食有时是日全食有时是日环食的原因是日地距离/月地距离≈太阳直径/月球直径（此比值约为390），而且月地距离的相对变化远大于日地距离的相对变化。下面用图来具体说明日全食和日环食的生成。在图4-17(a)中，自己并不发光的月球在背着太阳的方向上生出一个黑暗的本影影锥，该影锥投在地面上，于是被此影锥罩住的人们便见到日全食。由于月球绕地球转动的轨道以及地球绕太阳公转的轨道都是椭圆，有时候月球本影影锥的尖端会停留在地球表面上空，无法落到地面，只有该本影影锥的延长线划出一个被称为"伪本影"的区域投射到地面上，在该区域内的观测者能看到日轮的边缘部分，但却看不到日轮的中央部分，这时发生的日食被称之为日环食[见图4-17(b)]。此外，在日全食的本影区域之外，或在日环食的伪本影区域之外，都有一个范围更大的半影区域，在半影区域中看到的是太阳只有一部分被月球影锥挡掉，这些地区见到的便是日偏食。

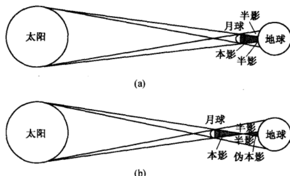


图4-17 日全食和日环食的成因

但是，天文学家所称的某月某日地球上发生了一次日偏食，并不是指日全食或日环食时伴随产生的日偏食，而是指地球上日全食、日环食均未发生时只发生了日偏食。这种情况又是怎样产生的呢？在图4-18中，白线是日轮在恒星背景上的运动路径，即黄

道，黑线是月轮每月在天球上运行的路径，即白道。两者之间有5°9′的交角。由于日轮在天球上每天自西向东只走约1°，而月轮每天可走13°，所以月轮是在追赶日轮，朔日前后当暗黑的月轮在离交点还有相当距离处赶上了日轮时，月轮只是从明亮日轮的半边穿过，无法遮住整个日轮，这种情况下产生的日食便是日偏食。

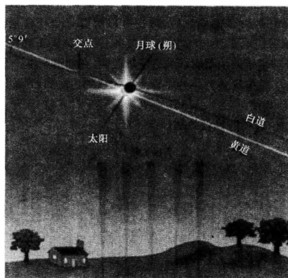


图4-18　日偏食的生成

日全食、日环食同时存在是现今很长一段时间中的产物。由于潮汐，地球自转在不断变慢，而同时月球在逐渐远离地球，当今这一段很长时间中，正好天球上日轮的大小和月轮的大小不相上下，日地距离和月地距离的小变动便可以造成地球上时而出现日全食，时而出现日环食。在若干亿年前，月球离地球较近，每次发生日食时月轮总要比日轮大，那时候只能发生日全食而不可能发生日环食。相反，从现在起若干亿年后，由于月球离地球的距离比现在要远得多，天球上月轮总是比日轮小，于是朔日时暗黑的月轮总是无法遮住整个明亮的日轮，那时只能发生日环食或日偏食，人们就再也欣赏不到日全食的奇观了。

上面讨论日全食或日环食的成因还只是一个静态的图像。实际上，由于地球在自西向东自转，赤道上地球自转的线速度为0.46 km/s，地理纬度较高处则自转线速度较小，若此时月球影锥在空中不动，地球自转就会使人们看到此影锥在地面上自东向西移动。但是，由于月球在绕地球公转，月球拖着其影锥以1.02 km/s的速度在空中自西向东运动，投射到地面上时此值会因地面纬度的增大而变小。但不论如何，两者的综合效应都

是月球的影锥在自西向东扫过地面，形成一条狭长的日食带。其中的全食带和环食带的宽度最多为 300 多km，但偏食带的区域要宽得多；日食带的长度不超过 15 000 km。

由于每次全食或环食发生时，全食带或环食带的面积大概只占整个地球表面积的千分之几，而每年发生日全食和日环食的次数平均说来不足 1 次，所以对于某一固定地点而言，大概要 300 多年才能看到一次日全食，对于日环食而言情况也是如此。

在介绍过全食带和环食带的概念后，现在可以解释日全环食是怎么回事了。在图 4－19中，若月球影锥射向地面时，全食暨环食带中心线 BAB' 正好位于图中所绘地球的上边缘，在 A 点时月球影锥的顶端刚好到达地球表面，在那里产生一个不大的全食区域；由于地面的弯曲，在 B 点和B'点月球影锥顶点就无法到达地面，到达地面的则是伪本影，于是在 A 点看到了日全食而在 B 点和B'点处则看到了日环食，至于 C 点所对应的广大地区，则可见到日偏食，这样的日食便是日全环食。

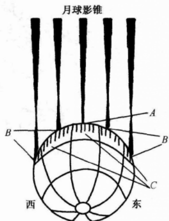


图 4－19　日全环食的生成

二、日食的过程

日食时，不仅月球的影锥自西向东扫过地球表面，而且在天球上暗黑的月轮也是自西向东逐渐遮掩日轮，最后逐渐离开日轮的。日全食时必然是月轮大于日轮，而日环食则必然是月轮小于日轮。日全食和日环食都分为 5 个阶段(见图 4－20)。第一阶段称初亏，月轮与日轮第一次外切，整个日食过程开始；第二阶段称日既或环食始，这时日轮和月轮第一次内切，日全食或日环食阶段开始；第三阶段称食甚，此时日轮中心与月轮中心最接近；第四阶段称生光或环食终，这时日轮和月轮第二次内切，日全食或日环食阶段结

束;第五阶段称复圆,日轮与月轮第二次外切,整个日食过程结束。日偏食只有初亏、食甚和复圆3个阶段,其定义和日全食或日环食中相应这三阶段的定义一样。

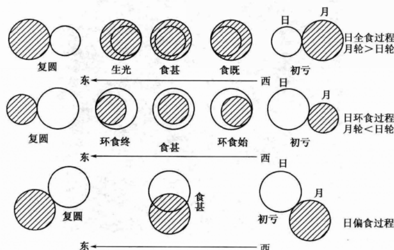


图4-20　日全食、日环食和日偏食的过程

日全食、日环食和日偏食三者中,日全食最壮观。日全食发生时,高悬于蓝天中的光芒万丈的太阳,先是其一边出现一丝黑影,然后日轮越来越多地被遮住,当整个日轮被吞食时,仿佛黑夜来临,群星闪烁,日轮的周边则闪耀着一圈不同颜色的光芒,其中有色球、日珥和日冕(见第六章第二节和第三节)。最惊心动魄的是贝利珠现象。那是在日全食开始和结束的一刹那,突然在日轮边缘爆发出明珠般的耀眼光芒(见图4-21中日轮的左下角),凡有幸一见者都会终生难忘。贝利珠是在月轮与日轮相内切的瞬间,阳光透过月球边缘环形山缝隙射出而形成的,这一景象因1836英国天文学家贝利(F. Baily)率先做出科学解释而以其姓氏命名之。

日全食从初亏到复圆的整个过程约长两个多小时,但从食既到生光的全食时间最长7.75 min,最短只有几秒钟。日环食的情况和日全食相仿,但日环食始至日环食终这段时间最长的可达12分4秒,比日全食时间的上限要长。

讨论日食时,常常会涉及“食分”这一重要概念。对于日全食和日环食,食分都定义为月轮直径与日轮直径之比。于是日全食的食分大于1,而日环食的食分小于1。往往食分大的日食更精彩,因为食分大的日全食往往也代表了全食带的宽度大,带中全食的时间较长;而食分很大(很接近于1)的日环食则表示日轮与月轮大小很接近,日甚时太阳只剩下薄薄的一圈,这样的环食被称为“金环食”,它像一只光芒四射的金色项链,十分美丽。日偏食的食分则定义为日甚时日轮被挡部分与整个日轮大小的的比值。



图 4-21 日全食开始或结束的一瞬间拍摄到的“贝利珠”

每年地球上发生的日食最少 2 次，最多 5 次。每世纪平均发生日全食 67.2 次，日环食 82.2 次，日偏食 82.5 次，日全环食 4.8 次，共 236.7 次。

三、月食

月全食发生在满月前后。在太阳照耀下地球也有一个本影影锥，该影锥在满月时月球轨道穿过处的直径约为月球直径的 2.5 倍。若月球整个进入地球的本影影锥，便产生月全食(见图 4-22)；若月球始终只有一部分进入地球的本影影锥，便产生月偏食；地球的本影影锥之外也有半影影锥；若月球只穿过地球的半影影锥，始终没有进入地球的本影影锥，这时月面就有些变暗，肉眼不易觉察出来，这样所谓的“半影月食”现象往往不算月食。

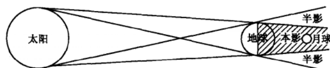


图 4-22 月全食的成因

每世纪中，发生月全食的次数与日全食不相上下，为何月全食比较常见而日全食却很少见到呢？这是因为月全食发生时面向月球的半个地球上的人都可以看到，但日全食发生时，只有地球上全食带中的人才能看到，而全食带的面积却只占地球面积的极小比例。

月食时，月轮在天球上也是自西向东向地球本影影锥接近的，但与日食不同的是，它不是去遮掩日轮而是"自投罗网"，进入地球本影影锥中去，所以月食时月轮的东边缘先被遮掩。月全食也分为初亏（月轮与地球本影第一次外切，月全食开始）、食既（月轮与地球本影第一次内切）、食甚（月轮中心与地球本影中心最近）、生光（月轮与地球本影第二次内切）和复圆（月轮与地球本影第二次外切，月全食结束）五个阶段，图 4 - 23 给出了月全食五个阶段的示意图。

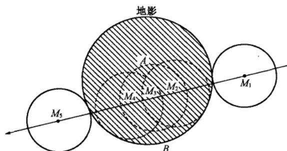


图 4 - 23　月全食的 5 个阶段（月球中心在 M_1，M_2，M_3，M_4 和 M_5 点时，分别对应于初亏、食既、食甚、生光和复圆）

月全食时，满月的月球并没有因为被地球本影所遮住而完全看不见，而是依然发出红铜色的微光。这是因为地球大气折射太阳光中的红光将月面稍微照亮所致。

月食的食分是月轮进入地球本影的最大深度与月轮直径之比，例如在月全食时，月轮进入地球本影的最大深度便是图 4 - 23 中食甚时 A，B 点之间的距离，它与月轮直径之比便是月全食时的食分。概言之，月全食时食分大于 1，而月偏食时食分小于 1。

第七节　月球的表面和内部结构

一、月球表面特征物

月球表面有环形山、月海、月陆、山脉、月谷、月溪以及月面辐射纹等月面特征物。

（一）环形山

环形山的英文名为 crater，原指火山口、撞击坑等，月面上这样的特征物极多，其中绝大多数确系陨星撞击形成的，本书把其中较大者称为环形山，而较小甚至很小的则称为陨击坑。

月面上直径大于 1 km 的环形山有 33 000 个以上，而直径 1 km 直至小到 1 m 的小环形山和陨击坑约有 30 000 亿个，此外还有无数直径小于 1 m 的小陨击坑。月面上的大环形山往往用科学家的名字命名。最大的环形山实际上已成为一个巨大的撞击盆地，例如直径达 312 km 的薛定谔环形山便是月球上最年轻的撞击盆地之一，在这块撞击盆地中间呈弧线状分布着五六个大小不一的环形山（见图 4 - 24），而它的周边也布满了大大小小的环形山。

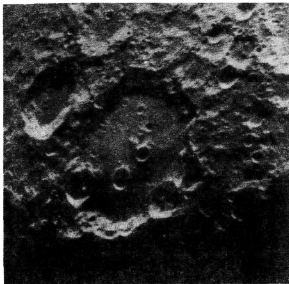


图 4 - 24　巨大的薛定谔环形山和它的周围

（二）月海

月球正面有许多暗黑斑块，因历史原因被误以为是月面上的海，实际上它徒有虚名，滴水不含，它只是月面上低洼的平原，因表面填满反照率低的玄武岩而显得暗黑。月球正面有危海、丰富海、澄海、静海、酒海、冷海、雨海、汽海、云海、湿海和风暴洋等 20 多个月海（见图 4 - 25），此外还有一些小的低洼之地被命名为特定名字的“湖”、“湾”、“沼”等。

这些低洼之地的面积约占月球正面的50%左右。但月球背面只有东海、莫斯科海和智海等很少的几个海。



(a) 月球正面的照片，系由上弦和下弦的照片拼接而成的



(b) 月球正面的手绘图，显示了不同月海的名称和位置

图 4 - 25　月球正面

（三）月陆与山脉

月陆是高出月海区域2～3 km的高地，是月球上最古老的地质区域，月陆上的岩石年龄达41～43亿年，比地球上发现的最古老岩石还要早3～5亿年，它已成为太阳系天体早期演化研究的宝贵财富。月陆上往往布满了环形山和陨击坑(见图4 - 26)。

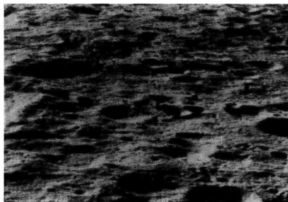


图 4 - 26　一幅月球背面中部月陆区域的照片(上面环形山和陨击坑星罗密布)

在围绕月海的月陆地区，往往有连绵不断的、险峻的山峰带，称为山脉。月球上山脉的外貌与地球上的山脉差不多，最著名的亚平宁山脉位于月球正面雨海的南部，它是月球上最长的山脉，蜿蜒 1 000 多千米(见图 4－27)。

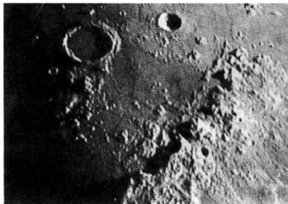


图 4－27　亚平宁山脉的一部分(它的北方还有两个醒目的环形山)

(四) 月谷与月溪

月谷是月球表面某些地区暗色的大裂缝，延伸达数百千米，宽 10 多千米。其中最著名的是阿尔卑斯大月谷，它像一支巨剑把阿尔卑斯山脉拦腰切断，十分壮观(见图 4－28)。



图 4－28　阿尔卑斯大月谷

比月谷细小的沟谷称为月溪，在月面上著名的月溪就有二三十条之多。它们弯曲延伸，有的可长达 200 多千米。

（五）月面辐射纹

月面辐射纹是以环形山为辐射点向四面八方延伸的亮带。在月球正面，第谷环形山、哥白尼环形山等都拥有很清晰的辐射纹。一般认为只有较大的环形山才有辐射纹，但月球背面的布鲁诺环形山直径只有 20 km，却拥有清晰的辐射纹。这是因为该环形山相当年轻，它形成至今只有几亿年，天体撞击产生该环形山时溅射出的明亮物质和暗色物质还保留着，尚未受太阳风等的作用而变暗，因而成为醒目的辐射纹（见图 4－29）。

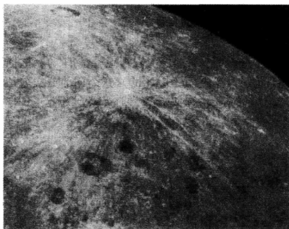


图 4－29　月球背面布鲁诺环形山的辐射纹

二、月面的物理状况

月球上几乎没有大气，虽有极微量的氖、氩、氦、氢等气体分子，那只是由于太阳风不断“吹拂”月面，以及从月球表面之下，时而逸出的气体造成的。它们形成的极稀薄大气的大气压只有地球海平面上大气压的 10^{-14}。月球上之所以没有大气乃是由于月球表面的逃逸速度只有地球上逃逸速度的 1/5 左右，因此即使早期的月球拥有相当浓密的大气，那它们也早已全都逃逸到太空中去了。

由于月球上几乎没有大气，你在月球上仰望天空，看到的将是漆黑天幕中满天星星与太阳同辉。而此时的你必须身穿太空服、戴上空气面罩，否则无法生存。由于没有大气来传播声音，月球上万籁俱寂。你想与同伴说话也必须事先准备好专门的通信设备。由于没有大气，月面上亮暗反差强烈，你一旦进入一座小山的阴影中，你的同伴很难找到

你。由于没有大气，缺乏热的传导介质，结果月面上阳光下的温度可达 110℃～140℃，而夜晚或太阳照不到的阴影区，温度则可低达－150℃。昼夜温差高达 300℃。由于没有大气，月球上显然也不可能存在液态水，当然也就更不可能出现地球上那种风雨雷电的气象现象了。由于没有大气的阻挡，月球表面完全暴露在陨星的轰击之下，经过长达几十亿年的时间，形成了环形山和陨击坑遍布整个月面的景像，而且由于没有风化作用，它们还始终保持着形成时的状态。

月球目前没有地球那样的全球偶极磁场，也没有地球所拥有那种磁层，所以太阳风可以不受阻挡地直达月球表面。

三、月面浮土层——未来能源的宝库

月面浮土层是指整个月面覆盖着一层由岩石碎屑、粉末、角砾、撞击熔融玻璃颗粒等构成的结构松散的混合物——浮土(见图 4－30)，这个词的英文名是 regolith，我国月球化学家称之为月壤，本书按照我国天文界的常规译法称之为浮土。浮土层的厚度在月海区约 4～5 m，但在形成时间更早的月陆区域可达 8～10 m。



图 4－30 登月的宇航员正在采集月面上的浮土

浮土层虽厚，但它有一定的坚硬度。登上月球的宇航员虽然会在浮土层上留下脚印，但脚印并不深。1969—1972 年，有 6 艘“阿波罗”号的登月器降落在月面上，其支撑部分陷入月面的浮土层很浅，根本没有影响到它们返程时的起飞。

浮土层的最宝贵之处是用它可以提炼出氦 3(^{3}He)，从而成为人类未来能源的宝库。

氦 3 是氦 4(^4He)的同位素，氦 3 的氦原子核中有 2 个质子、1 个中子，而氦 4 的氦原子核中则有 2 个质子、2 个中子。在自然界里，氦 4 在所有氦原子中的丰度占 99.999 86%，而氦 3 的丰度只占 0.000 14%。然而，月球上浮土层中却拥有丰富的氦 3，这是为什么呢？本章第三节中已指出，由于地球磁层的保护，太阳风无法到达地面，但月球上情况就不同了，由于它不存在偶极磁场和磁层，太阳风可以长驱直入，直达月球表面。太阳风中带正电荷的粒子主要是质子和氦核(包括氦 4 和氦 3 的原子核)，它们以很高的速度到达月面后，钻入浮土层的各种粒子中，深度可达 30～50 nm。在月球诞生至今的 40 多亿年中，这一过程从未停止过，而且由于这期间大大小小的陨星不断降落到月球表面，它们在不断地上下翻耕着浮土层，使厚达数米的浮土层中含氦核的比例上下相当均匀。根据阿波罗飞船的宇航员从月面捎回的浮土样品的分析和科学家们的深入研究，整个月面上的浮土层中含有的氦 3 总量达 10 亿～50 亿 kg。但在地球上，氦 3 却很少。

氢元素有三种同位素：其中氕(^1H，原子核中只有 1 个质子)在自然界中丰度最高，占 99.985%；氘(^2H，原子核中有 1 个质子、1 个中子)的丰度略小于 0.015%；还有氚(^3H，原子核中有 1 个质子、2 个中子)其丰度只占 10^{-17}。1 个氦 3 原子与 1 个氘原子进行热氦聚变反应，产生 1 个氕原子和 1 个氦 4 原子，并伴随释放出能量。利用氦 3 发电正是采用这一反应。研究指出，这一反应的产能率很高，中国 21 世纪 10 年代末的发电量若全部用这种反应来提供，只需要 2 万多 kg 氦 3 就够了；而 21 世纪 10 年代末全世界一年的发电量全部用这种反应来提供，也只需要 15 万 kg 氦 3 就够了。如果考虑到核聚变能转变为电能过程中存在能量损耗，实际需要的氦 3 会更多，可能是该理论值的 2 倍左右。不论如何，月球上丰富的氦 3 可以满足地球上数千年甚至上万年的发电需要，而且这种核聚变产生的能量还是一种不产生温室气体排放、不产生放射性废物的符合环境保护要求的能源。

上面的叙述表明，我们称月面浮土为未来能源的宝库是毫不为过的。当然要真正实现上述构想，还必须解决月面浮土中氦核的收集、氦核中氦 3 与氦 4 的分馏、氦 3 如何以较低成本运回地球、利用氦 3 可控核聚变反应的商业化发电问题等各种困难。也许可以预期，到了本世纪末，这些问题将会一一得到解决。

四、月球内部结构

根据对月震探测的研究以及对月球重力场探测结果的分析，发现月球内部从内向外也可以分为月核、月幔、月壳三层。月核的半径，不同研究者所得的结果很不一致，但均在 300～700 km 之间，它是一个固体核球，其中靠近中心部分可能是密度较高的铁核。从月核向外则是月幔层，它的厚度为 973～1 373 km，即若认为月核半径为 300 km 时，月

幔的厚度便是 1 373 km，而当月核半径为 700 km 时，月幔的厚度便只有 973 km 了。或者说，月幔必然在离月球中心 1 673 km 处截止，因为该处以外部分已属于月壳的范围了。离月球中心 1 673 km 以上是月壳。实际上，月球正面和月球背面的月壳厚度是不同的，月球正面月壳的厚度平均约 50 km，而月球背面则平均约 74 km。平均起来，月壳的厚度取为 65 km。由于月球半径为 1 738 km，所以月壳是从离月球中心 1 673 km 开始，直至月球表面为止(见图 4－31)。

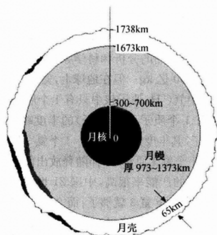


图 4－31 月球内部结构示意图

第八节 月球的起源和演化

一、早期的三种月球起源说

20 世纪 70 年代初以前，人们曾对月球的起源提出过三种假说。用一句比较形象化的话来概括，就是“月球是地球的女儿、妻子，还是姐妹”？这句话概括了月球起源的分裂说、俘获说和共生说之争。然而，到 20 世纪 70 年代前期为止，这三种假说先后出现了不同的困难，都被一一否定了。

早在 1881 年，英国天文学家达尔文(G. H. Darwin)最早提出了月球起源的共振分

裂假说，认为早期处于熔融态的地球在快速自转时受太阳起潮力作用产生潮汐，而当时处于熔融态且近似流体的地球又存在一个最小自由振动周期，当该周期与地球潮汐周期相等时就会发生共振，共振使潮汐的振幅越来越大，结果原始地球振幅最大的部分脱离地球形成了月球。但这一假说被英国地球物理学家杰弗里斯(H. Jeffreys)否定，他指出潮汐共振发生时，地球自身的摩擦阻尼随潮汐变形力的立方而增加，从而限制潮汐共振的振幅，因而原始地球不会发生分裂。20世纪60年代，有人又提出了一种分裂假说的修正版，但后来也被否定了。

20世纪60年代出现的月球起源的俘获说，一度得到了美国著名化学家尤里(H. C. Urey)的支持。该假说认为月球是地球从绕太阳运行的其他轨道上俘获过来的。但太阳系其他卫星的质量往往只有所绕转的行星之质量的万分之几，甚至不足万分之一，而月球的质量却是地球的1.23%，月球被地球俘获远比其他卫星被它绕转的行星所俘获要困难得多，而且月球被俘获后又要在近圆的椭圆轨道上绕地球公转，其可能性几乎等于0，计算机的模拟计算也完全证实了这一点。因此，后来连尤里本人也不再坚持这一假说了。

也在20世纪60年代时，尤里在抛弃月球起源的分裂说后，转而提出月球起源的共生说。他认为在太阳系起源的原始星云中，有无数“星子”环绕原太阳在黄道平面上转动，后来不少星子形成行星与地球，而地球附近的其他星子则形成了月球。角动量是描述物体或物体系统转动状态的物理量，角动量守恒是物理学的普遍定律之一。冰上花样滑冰运动员张开双臂时转速就慢，收拢双臂时转速就快，这便是角动量守恒的典型事例。人们目前不难算出地月系的角动量，但月球起源的共生说却无法指出目前地月系的较大的角动量是怎样产生的。该学说也无法解释在太阳系原始星云中几乎同一区域生成的地球和月球，为何前者铁元素很丰富但后者却十分缺铁。因此，看来同源说也难以成立。

二、大碰撞分裂假说

1975年，美国天文学家哈特曼(W. Hartmann)和戴维斯(D. Davis)共同提出了大碰撞分裂假说。接着，另一位美国学者卡梅伦(A. G. W. Cameron)也提出了类似见解。该学说认为，约45亿年前，原始地球被一个大小类似于火星的天体斜着碰撞，后来撞击碎片在环绕地球的轨道上形成了月球。大碰撞分裂假说大体上可以分成图4-32所表示的5个阶段：a. 一个类火星天体正斜着向地球撞来；b. 类火星天体已撞上地球；c. 类火星天体把地幔的一部分撞出来了，自己也撞成了碎块；d. 被撞出的地幔的大部分物质和类火星天体的核又降落到地球上，后来成为地球的一部分，但大部分类火星天体的幔和少

部分地球幔中的物质则在绕地球转动；e. 绕地球转动的物质后来演变为月球。这一学说可以解释目前所知的地月系的主要事实，而且 21 世纪初美国女天文学家坎纳普（R. Canup）等人又用高速计算机作进一步模拟计算，对碰撞中的许多数据作精心选取。这一学说现在看来似乎比较圆满，但它是否能经得住今后不断更新的月球新探测资料的检验还不得而知。

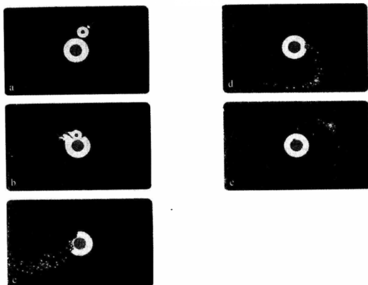


图 4－32　大碰撞分裂假说示意图

三、月球的演化

月球从形成至今的演化可以分为如下五个阶段：

（1）"岩浆洋"阶段。约距今 45.4 亿年前月球刚生成时，由于放射性元素衰变释放出巨大能量，月球表面处于约 1 000℃高温的"岩浆洋"阶段。

（2）月陆形成阶段。约距今 41 亿年前，沸腾的月面逐渐冷却，熔点不同的矿石先后结晶，结果密度低的钙长石漂浮在结晶岩浆顶部，形成富含钙长石的月壳，并在此时期率先形成了月陆。

（3）月海形成阶段。距今 40 亿至 38 亿年前，有一颗直径近百千米的小行星猛烈撞击月球表面，发生了所谓"雨海事件"，月球正面广泛分布的月海正是在此时和此后不长的时期内形成的。

(4) 月海玄武岩喷发阶段。距今38亿至32亿年前，在月壳较薄的月海底部，出现了多次月海喷发事件，结果玄武岩岩浆大量充填到月海底部。

(5) 月球晚期演化阶段。32亿年以来，月球内部能源逐渐枯竭，大规模岩浆喷发不再出现，其地质演化已处于停滞状态，但小天体和陨星的撞击不断，造成当今月面斑驳陆离、千疮百孔的面貌。

第五章　行星、矮行星和太阳系小天体

第一节　行星的运动

一、行星的视运动

行星的英文名是 planet，该词原先的含义是“流浪者”，意指它在满天的恒星间穿行、流浪。中国古代称它为“行星”，以便与肉眼看去相对位置不变的“恒星”相区别，也与英文解释具有相同的含义。行星在天球上诸恒星间穿行时，大部分时间自西向东走，称“顺行”，但也有少部分时间自东向西走，称“逆行”，在顺行转变为逆行或从逆行再转变为顺行时，它会在若干天中在恒星间位置不动，称为“留”。在这一过程中，由于它在赤纬方向上位置也有微小变化，结果走的路径每次往往并不一样，会出现图 5－1 中 a,b,c,d 四种形态。

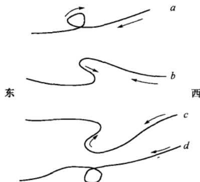


图 5－1　行星的 4 种视运动路径

15 世纪以前，行星上述的视运动路径很难加以解释。1543 年，波兰著名天文学家哥白尼提出划时代的日心地动说后，行星这一视运动路径便很容易解释了，它是地球和行星都在绕太阳公转的必然结果。下面以火星为例说明之。在图 5-2 中，地球在里面的轨道上绕太阳公转，火星则在外面的轨道上绕太阳公转。由于地球离太阳近，绕日公转较快，而火星离太阳远，绕日公转较慢，当地球绕太阳走了半圈，分别在位置 1，2，…，7 时，火星只在公转轨道上走了小半圈，其相应位置分别为 1′，2′，…，7′，于是地球上看火星在众恒星背景上的投影位置 1″，2″，…，7″就出现了顺行、留、逆行、留、再顺行的路径。

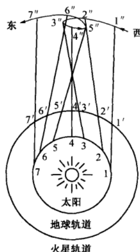


图 5-2　火星在恒星背景上视运动路径的形成

太阳系中的八大行星，按离太阳的距离由近及远排列的顺序为水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星和海王星。其中水星和金星在地球轨道之内绕太阳公转，叫做地内行星；而火星等其余 5 颗行星在地球轨道之外绕太阳公转，叫做地外行星。

当一颗地内行星绕太阳公转时，地球上会看到哪些重要的视运动特征？在图 5-3 中，近似取地球 E 和地内行星 P 都在圆轨道上绕太阳 S 公转，于是行星 P 在绕日公转过程中有几个很重要的特征位置。图中 P_2 和 P_4 分别称为东大距和西大距，它们是从地球上看内行星与太阳距离的张角（$\angle SEP_2$ 或 $\angle SEP_4$）最大的地方。对金星而言，此角为 45°～48°，东大距或西大距分别是夕阳西下之后或朝阳东升之前，它作为明亮的长庚星或启明星高挂天际的时候。若通过望远镜观测，可以看到被太阳照亮的它正巧有一半面向观测者，呈现出与月亮上弦或下弦相类似的位相。对于水星而言，由于其轨道靠太阳太近，在东大距或西大距时，水星与太阳对地球的张角 $\angle SEP_2$ 和 $\angle SEP_4$ 只有 18°～28°，也

许用望远镜可以观测到它，但肉眼看去它很可能已淹没在落日的余辉或旭日前的晨曦之中，根本无法看到它。当内行星位于 P_1 和 P_3 时，分别称为上合和下合，从地球上看去它们与太阳在同一方向上，除下合时发生凌日这一特殊情况外，根本无法看到它们。

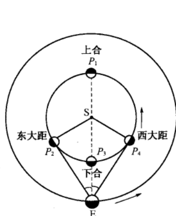


图 5－3 地内行星的视运动特征

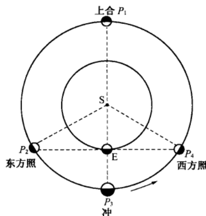


图 5－4 外行星的视运动特征

凌日时，地内行星下合且地球、该行星和太阳三者位于一条直线上，由于该行星视直径远比太阳小得多，它只能在太阳表面留下一个小黑圆斑，当这个小黑圆斑从太阳的一侧走向另一侧时，凌日也就结束了。由于水星和金星绕日运动的轨道面与黄道面都有倾角，所以并非每次水星和金星下合时都可以看到凌日，根据天文学家的计算，水星凌日平均每世纪发生 13 次；金星凌日平均每 243 年才发生 4 次。

当一颗地外行星绕太阳公转时，地球上会看到哪些重要的视运动特征呢？在图 5－4 中，近似取地球 E 和地外行星 P 绕太阳 S 公转的轨道都是圆。当该行星处在 P_1 位置（称上合）时，从地球 E 处看去，太阳和 P_1 几乎在一直线上，此时该行星将淹没在太阳的强烈光芒中。行星位于 P_2 和 P_4 时分别称为东方照和西方照，此时从地球 E 看去，行星方向与太阳方向在黄道上正好相差 90°，日落时位于东方照的行星正好处于上中天附近；而午夜时位于西方照的行星即将从东方地平线升起，到了拂晓前该行星即将处于上中天，并在晨曦之中逐渐失去光芒。行星位于 P_3 时称为冲，此时从地球上看去，太阳和行星正好方向相反，太阳在西方下落时行星在东方升起，然后整夜在天空闪耀，直至朝阳升起时它落到西方地平线之下。

二、行星的真运动

哥白尼的日心地动说属于几何天文学，因为它虽然提出了诸行星（包括地球）都沿圆

轨道绕太阳匀速公转的几何图像，但却未能揭示产生这种运动的原因。

1609—1619 年，使用丹麦天文学家第谷(Tycho)当时最精确的行星观测资料，开普勒提出了著名的行星运动三定律：

(1) 行星绕太阳公转运动的轨道是椭圆，太阳位于它的一个焦点上；

(2) 联结太阳到行星的直线在相等时间内扫过的面积相等；

(3) 行星公转周期 T 的平方与轨道半长径 a 的立方成正比，即 T^2/a^3 = 常数。

行星运动的三定律提出了行星在椭圆轨道上绕太阳公转的崭新观念，揭示了行星运动的某些定量规律，并为万有引力定律的诞生奠定了基础。

在开普勒和伽利略等人所做的天文学和物理学研究的基础上，牛顿(I. Newton)在 1687 年提出著名的万有引力定律，指出两天体间的引力与它们两者质量的乘积成正比，而和它们两者间距离的平方成反比；他还提出了著名的惯性定律——任何物体若无外力作用时将始终保持原有的静止或匀速直线运动的状态。使用这两个定律，很容易解释行星为什么绕着太阳公转。在图 5-5 中，一方面行星 P 沿切线方向 PA 作惯性运动，PA 也可视为惯性速度的大小，另一方面太阳的引力又起到向心力的作用，把行星 P 拉向太阳 S，PS 为引力加速度的方向，结果导致行星 P 沿 PA' 方向运动，此后每到一个新位置都有类似情况发生，于是行星 P 既不会脱离太阳引力向前作惯性飞行，又不会受太阳的引力作用掉到太阳上，它始终沿椭圆轨道绕太阳公转。至于行星的公转轨道是接近圆，还是一个偏心率稍大的椭圆，甚至于其他什么轨道，主要取决于该行星在近日点处速度的大小。

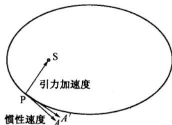


图 5-5　行星绕太阳公转的原因

天文学家们对太阳系中各行星的真运动资料作了统计和研究，发现太阳系中各行星的轨道有如下三个重要特点：

(1) 共面性。除水星对黄道面的倾角达到 7°之外，金星、火星、木星、土星、天王星和海王星对黄道面的倾角分别为 3.4°，1.8°，1.3°，2.5°，0.8°和 1.8°，都相当小。天文学家还指出，更恰当地说不能以黄道面为基准，而应该以“不变平面”为基准。不变平面的计算方法相当复杂，但大致说来不变平面与号称“巨无霸”的木星轨道平面相当接近，不变

平面与黄道面的交角约为 1.5°。可以看出，若以不变平面为基准，各行星的轨道平面与它的偏离就更小了，也更说明太阳系各大行星确实符合共面性这一特点。

(2) 近圆性。所有行星绕太阳公转的轨道都是椭圆，但它们的偏心率除水星达 0.21 外，金星、地球、火星、木星、土星、天王星和海王星的轨道偏心率都小于 0.1，也就是说跟正圆的差别很小，这一特征称为近圆性。

(3) 同向性。地球和其他行星都在同一方向上绕太阳公转，而且与太阳自转方向也一致。这一特征被称为“同向性”。

上面只是介绍了行星真运动轨道的若干特点，至于如何定量地研究行星的真运动，这已超出了本书的范围，此处只好从略。

第二节　类地行星

在太阳系 8 颗行星中，水星、金星和火星与地球比较类似：它们都位于离太阳最近的区域；都有固体的表面；平均密度都比较大；体积和质量都比较小；它们或者没有卫星(水星和金星)，或者卫星甚少(地球和火星)；它们或者几乎没有大气，或者虽有大气，但大气中氢和氦的含量很少。由于这些相似之处，它们被划为与地球同一类型，称为类地行星。

一、水星

(一) 概况

水星离太阳的平均距离仅为 0.387 天文单位(1 天文单位指地球绕日公转轨道的半长径，约为 1.496×10^{8}km)，它在轨道上的运动速度达 47.89 km/s，是 8 颗行星中运动速度最快的，也许由于这个原因，在英文中它用 Mercury 命名，该词在罗马神话中是一位为众神传信的飞奔着的信使。它绕太阳的公转周期仅为 87.97 日，它的自转周期则为这一公转周期的 2/3。由于水星的自转方向与其公转方向相同，可以推算出水星上的一昼夜长达 175.94 日，相当于地球上近半年的时间。

水星是太阳系中最小的一颗行星，它的半径只有 2 440 km，约为地球赤道半径的 38%，其质量只有地球质量的 5.55%。表面重力加速度为 3.7 m/s^{2}，其逃逸速度只有 4.3 km/s。表面上几乎没有大气，只有因太阳风带来的和水星内部放射性元素衰变释放的氢、氦、氩、氙等少量气体，它们形成的表面气压仅为地球表面大气压的 2×10^{-12}。由于水星离太阳近，又没有大气的保护，所以水星表面昼夜温差相差很大，在长达 87.97 日的白天，温度高达 477℃，而在同样时间的漫漫长夜中，温度则下降到－173℃，昼夜温差

竟高达 650℃。

水星的平均密度为 $5.4\times10^3 kg/m^3$，与地球的平均密度十分接近。它和地球一样，都是以硅酸盐为主要成分的固态行星。据研究，水星的内部结构与地球很类似，从中心向外也分为核（以铁核为主）、幔、壳三部分，只是各部分所占的比例不同而已。

（二）近日点反常进动

水星近日点在其轨道平面上移动，天文学上称此为进动，每一百年中进动值达 5 601″，用牛顿力学只能解释 5 558″，还有 43″无法解释，这被称为水星近日点反常进动问题。有的天文学家曾认为水星之内还存在一颗绕太阳转动的行星，由于它的额外引力作用才造成这种反常进动，但始终没有寻找到。1915 年爱因斯坦（A. Einstein）提出广义相对论，他用这一新引力理论解释了这种反常进动。

（三）水星表面

美国的“水手 10 号”飞船曾在 1974 年 3 月 29 日和 9 月 21 日以及 1975 年 3 月 16 日三次飞越水星表面，用其上的摄像机拍摄到水星表面 45%区域的 2 700 幅图片。这些图片揭示，水星表面有大量的环形山，其表面形态酷似月球表面（见彩图 5），但缺乏月球正面那种填满暗色熔岩的“海”。

水星表面上还广泛分布着高达 1～2 km 的连绵不断的叶状悬崖，它们切割环形山、撞击坑和平原，其实质是一种断层（见图 5－6）。它们可能是这样产生的：水星形成之初，内部温度较高，后来逐渐冷却，整个水星收缩，于是岩壳层的表面便产生许多断层。

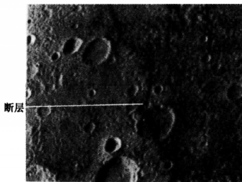


图 5－6　水星表面一条形如叶状悬崖的断层

(四) 水星磁场

"水手10号"还探测到水星也有一个与地球磁场十分相似的偶极磁场，但它在赤道表面的磁感应强度仅为 2×10^{-7} T，只有地球赤道表面磁感应强度的0.7%，所以比地球偶极磁场要弱得多。此外，水星磁场的周围也形成了与地球类似的磁层结构。

二、金星

(一) 概况

金星的英文名叫 Venus，取自罗马神话中爱和美的女神维纳斯。它是以硅酸盐为主要成分的固态行星，其半径是地球的94.9%，质量是地球的81.5%，密度是地球密度的95%。两者的内部结构也类似，都由核、幔、壳三部分组成，而且都有一个相当大的铁核。从这些方面来看，金星真像是地球的"小姐妹"。

金星在近圆的轨道上绕太阳公转，它离太阳的平均距离为0.723天文单位，公转周期为224.7日。它是太阳系内唯一逆向自转的行星，即在其上看太阳是西升东落的，它的自转周期约为243日。在这样的公转周期和自转周期下，可以算出金星上的一昼夜为116.8日。

(二) 金星大气

金星有浓密的大气，表面大气压约为地球表面大气压的90倍。由于大气浓密，"水手10号"宇宙飞船拍到的一幅凸月状的金星像(见彩图6)，完全被浓云所覆盖，看不到表面上任何细节。

金星大气的主要成分是二氧化碳，占96%以上；氮占3.5%；次要成分有二氧化硫、氩、一氧化碳、水汽、氖等。金星大气中，在离金星地面高度40～65 km处有两大云层，云中主要成分是硫酸、盐酸、氢氟酸等的固体小颗粒凝结核和这些酸的液滴，这种云可保持几天到几星期不沉降，而且由于云下面温度高，下沉的液滴会蒸发，不会向金星表面下酸雨。

宇宙飞船对金星拍摄的紫外传真照片显示，它的上层有形如横躺着的"Y"形云层(见图5-7)。研究表明，金星上层大气中存在着周期仅为4天的自西向东的环流，横躺着的"Y"形云正是这种大气环流造成的。

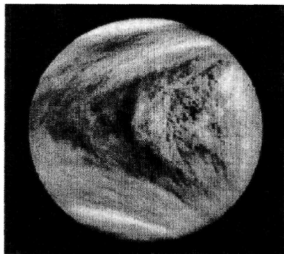


图 5-7　金星上层的"Y"形云和大气环流

金星大气中含量极高的二氧化碳会产生强烈的温室效应，即阳光可以穿过二氧化碳加热金星表面，而行星向外辐射的热能却被二氧化碳阻挡，从而使温度升高。金星表面温度高达 480℃，而且没有地区、季节和昼夜的差别。在这样的高温下，锡、铅等金属都会被熔化。整个金星表面因温室效应变成一座大炼狱，这也提醒了地球上的人类不要肆意排放二氧化碳等废气，否则地球有可能成为下一个金星。

（三）金星表面

金星被厚厚的大气和浓密的云层所包围，光学观测无法看到它的表面。要探测金星表面只有两个办法，一是用雷达波探测，二是用探测器降落到金星表面进行实地勘测。对金星的探测表明，它的表面既有广袤的平原、宽阔的高原，也有起伏的山地和深深的裂谷。金星上还有 1 100 个火山构造，图 5-8 是金星表面上两座大火山周边直径 650 km 区域的雷达像。金星上还散布着约 1 000 个陨星坑，其中很多直径大于 3 km，它们是金星上大的陨星降落所遗留下来的。

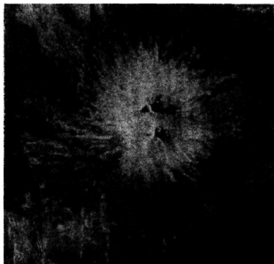


图5-8 金星上两座大火山及周边区域的雷达像

三、火星

（一）概况

火星是一颗火红色的行星，中国古代称它为荧惑，在西方则以罗马神话中的战神 Mars 来称呼它。它是地球外侧的近邻，离太阳的平均距离是 1.524 天文单位。每隔 2 年 50 天，它冲日一次，但每次冲日时离地球距离变化较大，只有每过 15～17 年在近日点附近冲日时它离地球才最近，这样的冲日叫火星大冲，下一次大冲将发生在 2018 年 7 月 27 日。

火星的质量为地球的 1/9，半径为地球的 53%，平均密度为地球的 71%，表面重力加速度为地球的 38%，逃逸速度为地球的 45%。火星表面的平均温度比地球上低 40℃，昼夜温差可达 100℃以上，赤道区中午温度为 20℃，极区长夜温度则低至－139℃。

火星公转周期为 687 天，相当于 1.88 年。火星自转周期 24 小时 37 分 23 秒，与地球自转周期很接近。火星赤道面与它绕日公转轨道面的交角为 23°59′，与黄赤交角很接近，所以火星上也有四季变化。

（二）火星大气

由于火星表面引力小，逃逸速度小，气体分子容易逃离火星，所以火星上大气较稀

薄，表面大气压只有地球表面的0.6%，相当于地球上空海拔30多千米处的大气压。火星大气中，二氧化碳占总质量的95.3%，由于大气极其稀薄，高比例的二氧化碳并未引起温室效应。此外，氮占大气总质量的2.7%，氩占1.6%，氧和一氧化碳合起来占0.2%。至于水汽，大概只占0.03%，如果将火星大气中的水汽全部凝固，也只能形成0.01 mm厚的水膜覆盖在火星表面上。火星上有云、雾、霜、风等天气现象。火星云一般是水冰云，有时也会出现干冰(固体二氧化碳)云，但云量比地球上少得多。

火星大气中经常会出现尘暴现象。火星上风速可达数十千米每小时，风把大量尘埃卷到空中引起尘暴。火星过近日点前后，南半球正处于春夏之交，日照强，大气不稳定，往往成为尘暴的发源地。大多数尘暴是区域性的，但每过两三年，几个区域性尘暴联合起来，把大量尘沙卷到30 km高空，发展成长达数月的全球性大尘暴。

(三) 火星表面

在望远镜中看火星，最醒目的现象是火星南北极区有白色的斑块，称为极冠，它的大小会随火星的季节变化而消长，因此往往在看到一个极冠很显著时，另一个极冠几乎看不见。极冠中的主要成分是干冰，但可能也有少部分水冰。

火星表层土壤含有呈红色的氧化铁成分，所以火星表面呈红色。火星地貌较复杂，大体上可用一个与赤道成30°的大圆将火星表面分成南北两半球：南半球地势较高，陨星坑星罗密布，岩石年龄大；北半球地势较低，有较多火山和火山形成的平原，岩石年龄小。

火星上最大、最著名的火山是奥林匹斯火山(见图5-9)。根据美国的“火星环球勘测者号”飞船在1997年10月发回的传真照片，该火山比火星表面高25 km，火山口(该图中心区域近圆形处)直径有近100 km，这两者都雄踞太阳系行星表面火山之冠。

在火星赤道以南，有一条长5 000 km的大峡谷，最大宽度处有几百千米，最深处达6 km，该峡谷称为水手谷(见图5-10)，是美国发射的“水手9号”探测器1972年在环绕火星的轨道上首先拍摄到的。

在目前的情况下，火星表面已不可能存在液态水。但1976年，美国的“海盗号”飞船在降落到火星表面以前，拍摄到火星上河床遗迹的照片(见图5-11)。有人认为，大概在三四十亿年前，火星上有过充足的大气、温暖的气候和降雨丰富的时期。那时候，汹涌澎湃的水流曾在这些河床上奔腾了多少年代。上述见解现在已得到证实，因为美国在2003年6月和7月相继发射的“勇气号火星探测车”、“机遇号火星探测车”于2004年降落到火星表面，并发现了多水条件下才能产生的岩石沉积物和相应的矿物，但多种探测器对火星的探测还未找到那里有生命存在的踪迹。

20世纪90年代，由于从一块来自火星的陨石艾伦山84001(ALH84001)中发现似乎

存在着很久前的微生物的痕迹，此后又发现火星目前可能还存在着地下水，于是火星是否存在过或目前还存在着生命的问题，依然是今后火星探测的重要目标之一。

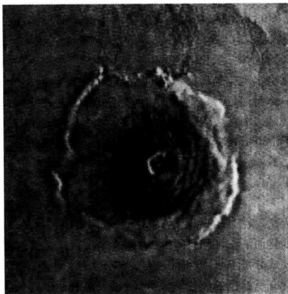


图 5-9　奥林匹斯火山的传真照片



图 5-10　水手谷的传真照片

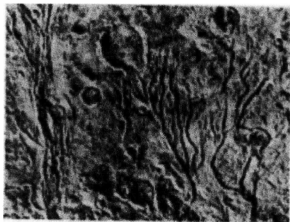


图 5-11　火星上河床的遗迹

（四）火星卫星

火星有两颗卫星——火卫一和火卫二。它们分别以 7.65 h 和 30.30 h 的周期在火星赤道面附近绕火星公转。从火星上看，火卫二是东升西落的，但火卫一由于其自西向东的绕转周期小于火星本身的自转周期，所以它是西升东落的。火卫一和火卫二都很小，形状不规则，前者的长轴为 26.6 km，后者的长轴仅仅 15 km。它们上面还有不少陨击坑。图 5-12 是 1977 年美国的"海盗 1 号轨道环形器"所拍摄的火卫一和火卫二的传真照片。可以看出，它们的形状很像是虫蛀鼠咬的坏土豆。

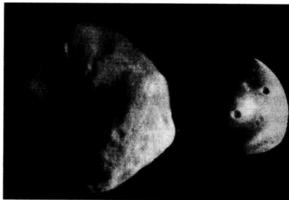


图 5-12　火卫一（较大者）和火卫二

第三节　巨　行　星

太阳系8颗行星，分为类地行星、巨行星和远日行星三大类。巨行星指的是木星和土星，它们的质量和体积都很大，卫星数目很多，离太阳的距离介于类地行星和远日行星之间，大气中的成分以氢和氦为主，而且有较强磁场和磁层。

一、木星

（一）概况

木星（见彩图8）在中国古代称为“岁星”，西方人则用罗马神话中的主神“朱庇特”(Jupiter)来称呼它。木星的质量是其余7颗行星总和的2.5倍，是地球质量的318倍。由于它的平均密度只有$1.33\times10^3 kg/m^3$，连地球密度的1/4都不到，所以它的体积是地球的1 316倍。木星“表面”（其大气压等于地球表面1个标准大气压处）的重力加速度是地球表面的2.6倍，逃逸速度是地球表面逃逸速度的5.3倍。

木星绕太阳公转轨道的半长径为5.20天文单位，公转周期为11.86年。木星赤道面与公转轨道面近乎重合，但其赤道区域和高纬度区域自转周期存在差异，前者为9小时50分30秒，后者为9小时55分41秒。由于木星自转很快，所以它的椭率比地球大得多，地球的椭率只有0.34％，而木星却高达6.5％，因此从望远镜中看木星，其视圆面略带扁圆形。

（二）大气和内部

木星大气既密且厚，大气中有许多明暗交替的云带，通常把亮的叫做带，暗的叫做带纹；云带往往与赤道平行（见图5－13），这是木星快速自转的结果。大气中最显著的特征是位于南纬23°左右的大红斑，自1664年光学观测发现它以来，它已经持续存在300多年。它的东西长2.6×10^4km，南北宽1.4×10^4km。图5－14是1979年“旅行者1号”飞船拍摄到的大红斑，其中的气流正在作反时针方向的旋转运动，它是一股旋转周期约6天的超级旋风。大红斑的颜色很可能是其中的有机分子、红磷，或其他硫化物造成的。

木星大气中主要成分是氢分子(H_2)，占85％以上；其次是氦，占14％；此外还有少量甲烷、氨、水汽、一氧化碳等。木星大气运动的重要特征是交替向东或向西的风流，称纬向环流，环流的平均风速为50 m/s，最大可达130 m/s，但木星大气中南北向的风很弱。

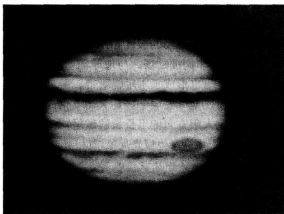


图 5-13　木星上与赤道平行的云带以及赤道之南的大红斑

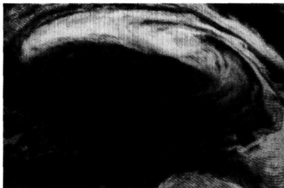


图 5-14　木星大红斑中的气流运动

木星内部从外向里分为外层、中间层和星核 3 层：外层没有固态表面，而是液态分子氢层；中间层在液态分子氢对内的高压作用下，其中的分子氢发生相变，变为液态的金属氢，所谓金属氢是指电子已经不受原子核的束缚，而能像金属中的电子那样自由流动，整个中间层全是液态金属氢；木星的最内层很可能是由岩石及冰物质构成的星核。

木星发出的热辐射是它吸收的太阳辐射的 1.67 倍，其能量来源问题还在探讨中。

（三）*磁场和磁层*

木星的磁场和磁层是 1973—1974 年美国的"先驱者 10 号"和"先驱者 11 号"飞船飞

越木星时首先发现的。木星表面的磁感应强度约为 $3\times10^{-4}\sim14\times10^{-4}$T，约比地球表面磁场强 10 多倍，它在木星表面附近是偶极磁场，其磁轴与自转轴的交角为 9.6°，偶极中心位于其赤道面上，但南北极性与地磁场的极性相反。此外，在木星的外部特别是 10 倍木星半径之外还有形态更复杂的非偶极磁场。与地球辐射带的形成相类似，木星磁场俘获来自太阳和宇宙线的带电粒子，也形成了木星辐射带。

木星也有磁层，其磁层半径比地球磁层半径约大 100 倍。面向太阳风吹来的方向上也有弓形激波和磁层顶，而在背太阳方向伸出长长的磁尾，有时甚至可达 9×10^{8}km。

类似于地球上的极光，木星上也会产生极光现象，其极光弧的长度甚至超过 3 000 km。

(四) 卫星

到 2008 年初已发现木星有 63 颗卫星，其中有近 50 颗是 1979 年以后通过空间探测等手段发现的。木星卫星中最著名的是 1610 年伽利略率先发现的 4 颗卫星——木卫一、木卫二、木卫三和木卫四，它们称为伽利略卫星。1979 年春，“旅行者 1 号”飞船拍摄了它们的传真照片(见图 5 - 15)。

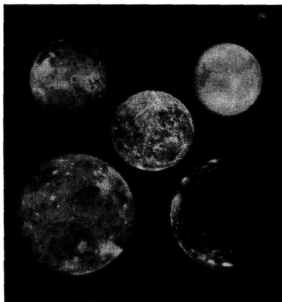


图 5 - 15　4 颗伽利略卫星和月球的比较

图中左上是木卫一，它的半径为 1 821 km，至今火山还在频繁地爆发，表面满目疮痍

是火山喷出物二氧化硫沉降造成的。右上是木卫二，它的半径只有 1 561 km，是 4 颗伽利略卫星中最小的，但由于它的表面被大量冰所覆盖，反照率高，因此依然显得很明亮；木卫二的冰层下面可能存在着因受木星和其他卫星引潮力的作用加热的液态水海洋，在这一海洋中是否存在着地外生命是有待进一步探索的问题。左下是木卫三，它的半径为 2 631 km，是太阳系中最大的一颗卫星，而且比水星还大，它的表面有不少大小不一的陨击坑。右下是木卫四，它的半径是 2 410 km，与水星的大小不相上下，它上面也有不少陨击坑。中间是月球，用它来比较 4 颗伽利略卫星的大小。

（五）木星环

1979 年 3 月，“旅行者 1 号”飞船在离木星 1.20×10^6 km 处穿越木星赤道面时，首次拍摄了木星环的照片（见图 5－16）。由于木星环很暗，其宽度只有数千千米，厚度只有几千米，而且其反照率又低。因此，在地球上用望远镜根本看不到。

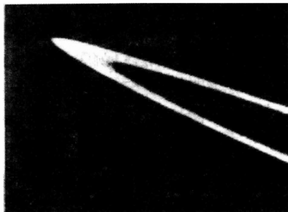


图 5－16　木星环

二、土星

（一）概况

土星（见彩图 9）在中国古代称为镇星或填星，在西方用罗马神话中农神 Saturn 命名。土星的轨道半长径为 9.537 天文单位，绕太阳的公转周期为 29.4 年。它是太阳系

中第二大行星，其质量约为地球的 95 倍，但体积却是地球的 755 倍。这是因为它的密度是太阳系行星中最小的，只有地球密度的 1/8，其值为 $7.0\times10^2\,kg/m^3$，比水的密度还要小。土星赤道上空的逃逸速度是 35.5 km/s。它的赤道面与公转轨道面的交角为 26.73°，与地球的黄赤交角相近。土星与木星类似，自转很快而且赤道附近和两极地区自转周期不同，前者约 10 小时 14 分，后者约 10 小时 40 分钟。快速自转造成土星的椭率大，达 9.8%。由于土星密度很低，自转很快，赤道隆起又很明显，它在赤道处的表面重力加速度竟比地球赤道表面略小。

（二）大气和内部结构

土星大气中分子氢（H_2）占总体积的近 90%，氦占近 10%，此外还有少量甲烷、氨等。土星表面上的云也像木星上的云一样呈现出亮带和暗色的带纹图案，但不如木星上清晰。与木星大气中相类似，土星大气中也有东西向交替的纬向环流，且风速比木星上更大。土星大气中有时会出现罕见的大风暴。

土星的热辐射是它吸收太阳能的 1.78 倍，与木星一样，这种内部能源的产生机制目前还不清楚。

与木星相类似，土星内部也可以分为 3 层：其最外层是液态氢分子层，中间层是液态金属氢层，最内层是由岩石和冰物质组成的固态核。

（三）磁场和磁层

土星的磁场也是偶极磁场，南极、北极的“表面”（大气压相当于地球表面 1 个标准大气压处）磁感应强度分别为 7×10^{-5}，$6\times10^{-5}\,T$，赤道“表面”为 $2\times10^{-5}\,T$，这比木星表面的偶极磁场弱得多，大体上与地球表面的偶极磁场不相上下，但其南极、北极的极性与地球磁场极性相反。土星的磁轴与它的自转轴几乎重合，且其偶极中心与土星质量中心也十分接近。土星也有类似于木星的辐射带，也存在着磁层。

（四）卫星

到 2008 年初已发现的土星卫星有 60 颗之多，其中 8 颗是 1980—1981 年“旅行者 1 号”和“旅行者 2 号”飞船发现的，42 颗是 2000—2007 年用空间探测等新手段发现的。只有土卫一至土卫十是 1966 年以前地面上观测发现的。

土星卫星中最著名的是土卫六，它的半径达 2 575 km，是太阳系中仅次于木卫三的

第二大卫星，而且还稍大于水星。它是太阳系中唯一一颗拥有浓密大气的卫星，1981 年 8 月“旅行者 2 号”飞船经过土星时拍摄了土卫六的照片，发现它被浓密的大气所笼罩(见图 5 - 17)。土卫六表面的大气压是地球表面的 1.5 倍，大气中氮约占 85%，甲烷约占 5%，此外还有氩、分子氢、水汽、一氧化碳、二氧化碳和乙烷等其他碳氢化合物。

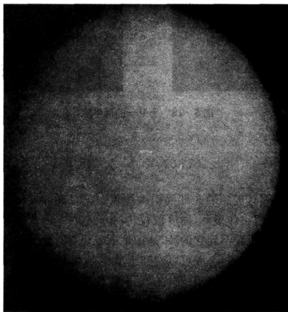


图 5 - 17 “旅行者 2 号”飞船拍摄的土卫六的照片

2005 年 1 月，卡西尼飞船所携带的惠更斯探测器降到土卫六的固体表面上，测得其表面温度仅为 -178℃，拍摄到表面上有亮暗交叉的结构，暗区似乎是充满甲烷或乙烷的冻土平原，而线条状的亮区可能是喷发水冰、氨与水混合物的火山或已经冻结的冰原高地。惠更斯探测器没有在土卫六上发现原先预料的湖泊和海洋，这对土卫六有可能存在地外生命的见解不利，但今后对此问题无疑还要作进一步的探索。

土卫一也是一颗很有代表性的土星卫星，它并非球体，而是一个 418 km×392 km×383 km 的三轴椭球体。图 5 - 18 是“旅行者 1 号”飞船在 1980 年 11 月拍摄的土卫一两个侧面的传真照片，可以看出它的表面布满了大大小小的环形山和陨击坑，其中最大的一个赫歇尔环形山(左半图右上角)直径 135 km，深 10 km，其内还有一个高 6 km 的中央峰。

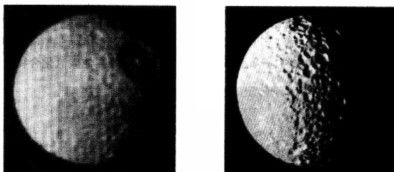


图 5－18　土卫一的两半球

（五）土星环

在望远镜中，土星因其美丽的光环而引人注目。土星环伸展很宽，其中较亮的部分宽度超过 6.0×10^4 km，但它却很薄，厚度仅仅 10 km 左右。因此，当它以其侧面正对着地球时，人们用小型望远镜看不到它的环，这正是土星环有时会消失的原因。

在地面上用小望远镜观测，一般可以看到土星环有 A，B，C 三个，B 环既宽又亮，它的外侧是 A 环，内侧是 C 环（又称纱环），而在 A 环与 B 环之间有一条明显的缝隙，这条缝隙是 1675 年法国天文学家卡西尼（G. D. Cassini）首先观测到的，所以称为卡西尼缝（见图 5－19）。

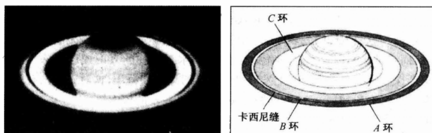


图 5－19　土星环（照片与图解左右对照）

1981 年 8 月，“旅行者 2 号”飞船在飞越土星时拍摄了土星的照片，发现土星环由无数层环构成，犹如一张巨大的“密纹唱片”（见图 5－20）。

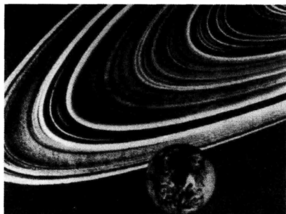


图 5－20　“旅行者 2 号”飞船拍摄的土星环(下侧是相同比例的地球，以便比较土星环的大小)

土星环实际上由无数固态氢、氨、二氧化碳等成分的碎冰块所构成，其大小约为几厘米至几十厘米。它们在土星赤道平面上不停地绕土星转动，因反射太阳光而呈现出明亮的光环。

第四节　远日行星

远日行星指天王星和海王星，它们的最大特点是八大行星中离太阳最远，从它们拥有浓密的大气，又不存在固体表面来说，它们与木星、土星相当类似，所以有人把八大行星分为类地行星和类木行星两类，在这种分类中它们都属于类木行星。但与木星、土星相比，它们的质量和体积远没有那么大，卫星数也没有那么多，尤其是大气中甲烷等的含量显著，所以有人把木星、土星、天王星和海王星再分为巨行星和远日行星两类，本书采用这种分类。

一、天王星

(一) 概况

天王星(见彩图 10)在英文中用 Uranus 命名，它是希腊神话中的天神，所以中译名定为天王星。它的轨道半长径为 19.19 天文单位，在这样远的距离上，太阳的视圆面已很小，它接收到的太阳辐射很少，所以天王星表面的平均温度仅为 57 K，即－216℃。天王星

的质量为地球的 14.37 倍，体积为地球的 63.1 倍，平均密度约为 1.26×10^3 kg/m^3，逃逸速度为 21.3 km/s，其赤道地区的表面重力加速度约为地球赤道地区的 0.86 倍。天王星的自转周期约为 16 h 多，而它的赤道面与其公转轨道面的交角为 97.86°，也就是说天王星的自转轴几乎就“躺在”它的轨道面上，它是太阳系中唯一一颗“躺着自转”的行星(见图 5-21)。由于它的公转周期约为 84 年，对于天王星表面的绝大部分地区而言，它既有一个长达 42 年的漫漫长夜，又有一个小小的太阳总是挂在天空的冗长白昼，其一昼夜长达 84 年。

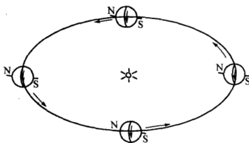


图 5-21 躺着自转的天王星

（二）大气和内部

1986 年 1 月，美国的“旅行者 2 号”飞船从天王星近旁飞越，获得了天王星的大气、磁场、卫星等的许多珍贵观测资料。天王星大气的主要成分是分子氢(H_2)，约占总体积的 82%，其次是氦，约占总体积的 15%，第三是甲烷占总体积的 2.3%，此外还有乙烷、水、氨和其他碳氢化合物。甲烷吸收入射的红光较多，而对蓝绿光散射较多，因此肉眼在望远镜中看到天王星呈蓝绿色。

天王星上，在半个公转周期始终受太阳光照的一极和始终处于黑夜的另一极在同样的气压高度上温度相等。这说明那里有一种快速传能机制在不断传导、转移太阳能，其机制目前还不清楚。

关于天王星的内部结构，由外向内分别由液态的分子氢层、冰的中间层以及岩石和冰的核心层这三层构成。

（三）磁场

天王星靠近其表面是偶极磁场，其两极磁性跟地球磁场相反，磁轴与自转轴的交角高达 58.6°，且磁轴中心偏离天王星质心，向自转轴北极方向移动了 7.5×10^3 km，赤道表面磁场强度为 2.3×10^{-5} T，此值比地磁场相应值稍小。天王星还存在非偶极磁场，也存在磁层和辐射带。

（四）环和卫星

1977年3月10日，天王星掩食恒星SAO158687，掩星观测发现，恒星在被土星掩食前后还出现了多次忽暗忽明的现象，从而推测天王星有多层光环存在。1986年1月“旅行者2号”飞船飞越天王星时，证实天王星的确有环，而且环有10多层之多。在图5-22中，横向的斜黑边界上侧为天王星掩食恒星时地面上发现的天王星环，斜黑边界下侧为“旅行者2号”飞船所发现的天王星环，图的最上侧希腊小写字母和数字是对这些环的命名。



图5-22 地面上探测到的（上部）和飞船发现的（下部）天王星环的比较

现已发现，天王星有27颗卫星，其中有22颗是1985年以后用空间探测等手段发现的，它们往往比较小，而且有不少并非球形。20世纪上半叶以前发现的只有天卫一至天卫五5颗卫星，1986年1月“旅行者2号”飞船飞越天王星时也对它们进行了许多探测，发现它们的表层往往由脏冰组成，而且表面形态各异。例如半径585 km的天卫二有大量环形山和陨击坑，这表明它的表面很古老，卫星内部的地质活动甚少，只有外部大大小小的陨星降落的撞击才造成这种状态；而最大的半径约790 km的天卫三表面上虽然也有几个直径近100 km的年轻的大环形山，但总的说来表面上环形山和陨击坑不多，这很可能是早期的很多这类结构已被后来从下面涌出的许多冰物质所填埋。

二、海王星

（一）概况

海王星在英文中用罗马神话中海神Neptune命名，所以中译名称海王星。它绕太阳公转轨道的半长径为30.05天文单位，公转周期为64.79年。它的质量为地球的17.15倍，体积为地球的58.84倍，密度为1.61×10^3 kg/m^3。其赤道表面重力加速度为11.15 m/s^2，逃

逸速度为 23.5 km/s。

海王星的赤道面与公转轨道面的交角为 29.6°，与地球的黄赤交角相近。海王星大气和云层的自转周期也存在赤道附近与两极区域有所不同的现象，平均为 19 h 多，但该周期又与海王星内部的自转周期不同，后者只有 16.1 h。

（二）大气和内部

海王星大气的主要成分是分子氢，约占大气总体积的 79%，其次是氦占 18%，海王星上甲烷也很丰富，约占 2.5%以上，此外大气中还有氨冰、水冰、硫氢化铵冰、甲烷冰的悬浮微粒。海王星的高层大气中有薄的雾霾层，在这之下气压约为地球上标准大气压 1.2 倍处有一层甲烷冰晶云层。

1989 年 8 月"旅行者 2 号"飞船越过海王星时拍摄的海王星照片中显示，海王星大气中有许多湍急紊乱的气旋在翻滚，例如在南纬约 22°处有一个醒目的椭圆形大暗斑，东西长 1.2×10^4 km、南北宽 8.0×10^3 km(见彩图 11)，它实际上是一个类似于木星大红斑的逆时针旋转大气旋，一个惊心动魄的风暴区。但与长期存在的木星大红斑不同的是，几年后哈勃空间望远镜发现该大暗斑已失去踪迹，而在北半球却出现了一个较小的暗斑。1996—2002 年，哈勃空间望远镜还拍摄到海王星大气中不断变化着的亮云带和暗带纹。

"旅行者 2 号"飞船测得海王星的表面温度高达 59 K 即－214℃，这比预料值要高 10 多度，甚至比天王星还高 2 K。测量表明海王星的热辐射是它接受太阳能的 2.7 倍，这说明海王星存在额外能源，海王星表面的较高温度和大气中的强烈活动都有赖于这一额外能源的支撑，但该能源的源泉至今还不清楚。

至于海王星的内部结构，从外向里可分为液态分子氢的外层，水、氨、甲烷冰组成的冰幔层以及岩石核心三部分。

（三）磁场与磁层

根据 1989 年"旅行者 2 号"飞船的探测，海王星也有偶极磁场，在赤道表面的磁感应强度为 1.4×10^{-5}T，比地球赤道表面的磁感应强度约小一半。与地球偶极磁场不同的是，海王星磁场的极性和地球磁场相反，磁轴与自转轴交角约近 47°，而且磁偶极中心沿磁轴向南偏 0.48 个海王星半径(见图 5－23)，这样高度偏心和倾斜的复杂磁场令人惊异。

海王星还存在着广延的磁层。由于海王星的磁轴与自转轴的交角较大，而且随着海王星的自转，该磁轴又绕自转轴回旋，于是磁层的位形也在不断变化中。

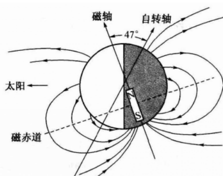


图 5-23　海王星的磁场

（四）卫星与环

在 20 世纪中叶以前，人们只知道海王星有 2 个卫星——海卫一和海卫二。1989 年"旅行者 2 号"飞船探访海王星时，发现了 6 颗海王星卫星。2002—2003 年，地面上采用新技术的超大型望远镜又发现了 5 颗卫星，从而使海王星的卫星总数达到 13 颗。

海卫一是海王星的最大卫星，它的半径为 1 353 km，是一颗绕海王星逆向公转的卫星。海卫一是一颗以同一面对向海王星的卫星，它也是一颗有强烈活动的卫星。最新奇的一种特征是它犹如火山的间隙泉，间断性地向外喷发气体氮、冰晶、甲烷和暗尘，向上喷发物的高度甚至可达 8 km。



图 5-24　海王星环

海王星也有环，环有 6 层之多，但里面 4 层较暗，只有最外面的 2 层较明亮。图 5-24 是 1989 年"旅行者 2 号"飞船在距海王星 1.10×10^6 km 处拍摄的，显示出海王星最外面的 2 个环，而且环的不同弧段亮度也不一样，这可能是环中的物质分布不均匀而造成的。

第五节 矮 行 星

一、定义

矮行星(dwarf planet)这个名词是 2006 年才出现的。2006 年 8 月召开的国际天文学联合会第 26 届大会上通过了一项决议,该决议对行星和矮行星分别作了定义,指出行星是在位于围绕太阳的轨道上、形状近乎球形、其轨道附近区域已经清空了的天体;而矮行星则是在围绕太阳的轨道上,形状近乎球形,其轨道附近区域尚未清空而且又不属于卫星的天体。该届大会上还进一步作出决议,冥王星降格为矮行星。

二、冥王星

冥王星的英文名是 Pluto,在希腊神话中是冥间地府的统治者。1930 年,冥王星被发现后,人们发现它相当特殊。从轨道运动特性来说,它的轨道半长径为 39.5 天文单位,比海王星离太阳更远,但由于它的椭圆轨道偏心率高达 0.251,是一个相当扁长的椭圆,所以它在近日点时走得比海王星离太阳更近,而且它的轨道倾角高达 17°。这两点都不太符合行星的轨道具有近圆性和共面性的特点。从物理特性来说,它又特别小,质量只有地球的 0.2%,体积只有地球的 0.6%,因此早就有人对它是否够得上一颗行星提出过质疑。

冥王星发现约 80 年来,对它的了解也有了长足的进展。在运动特性方面,它的公转周期达 247.69 年;自转很慢,自转周期为 6.387 3 日;自转轴与轨道面交角为 120°,即它是倾斜着逆向自转的。在物理特性方面,它有稀薄的大气,但表面上的大气压只有地球上标准大气压的 10^{-5},大气中主要成分是甲烷和氮;它有固体的表面,上面主要覆盖着甲烷冰,此外还有水冰、一氧化碳冰和氮分子冰;表面温度为 −233℃～−213℃。

1978 年 6 月,美国天文学家克里斯蒂(J. W. Christy)发现了冥王星的第一颗卫星,它被命名为卡戎,其英文名 Charon 在希腊神话中是冥海中渡亡灵的艄公,这与用希腊神话中的 Pluto 来命名冥王星真是最佳匹配。在中文中,它被译为冥卫一(见图 5-25)。冥卫一的直径约为冥王星的一半,它的自转周期和绕冥王星的公转周期完全相同,都等于冥王星的自转周期 6.387 3 日。结果冥卫一不仅始终以同一面面对冥王星,冥王星也始终以同一面面对冥卫一,于是冥卫一成了太阳系中独一无二的天然同步卫星。2005 年 5 月,哈勃空间望远镜又发现了冥王星的另外两颗卫星冥卫二(Nix)

和冥卫三(Hydra)。

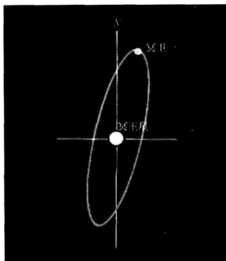


图 5-25　冥王星与冥卫一

三、阋神星和柯伊伯天体

1951 年，美国天文学家柯伊伯提出，在冥王星轨道两侧宽约 3.0×10^9 km 的环状区域内有 10 亿～100 亿颗以冰为主要成分的小天体绕太阳公转。20 世纪末以来的天文发现证实了这一见解，这个环状区域现称为柯伊伯带，他所预言的小天体则被称为柯伊伯天体。到 2008 年 3 月为止，已发现柯伊伯天体 1 074 颗，其中有几十颗大小与冥王星相当的已成为矮行星的候选者，这些候选者中阋神星已确认为矮行星。它是 2003 年 10 月由美国天文学家布朗(M. Brown)在帕拉玛天文台发现的，将它临时命名为齐娜(Xena)。2005 年发现该星比冥王星远得多，也比冥王星大。于是他宣布发现了太阳系的第十颗行星。齐娜的发现使冥王星、齐娜这类天体是否应算作行星成了一个迫切需要解决的问题，并导致了矮行星这一名称的出台。此后，齐娜被确认为矮行星，并用希腊神话中专门挑起女神们之间不和与纷争的女神 Eris 正式命名它，中译名定为阋神星。2005 年 9 月，布朗等人又用凯克 10 m 望远镜发现了该星的一颗卫星(见图 5-26)。该卫星用希腊神话中 Eris 的女儿的名字 Dysnomia 命名之。

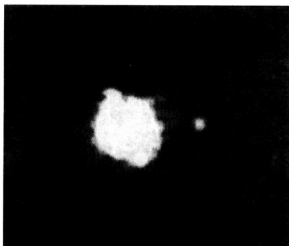


图 5-26　阋神星和它的卫星的照片

四、谷神星

谷神星(Ceres)是最早发现的一颗小行星，它是球形的，是小行星中最大的一颗，直径933 km。与我国青海省相比，谷神星的直径略大于其南北方向的尺度，而小于其东西方向的尺度(见图 5-27)。它在半长径为 2.77 天文单位的椭圆轨道上绕太阳公转。2006 年国际天文学联合会第 26 届大会上对行星和矮行星的定义出台后，它完全符合矮行星的定义，因而被升格为矮行星。

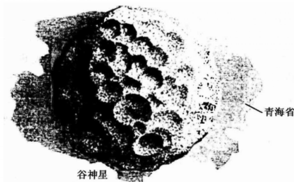


图 5-27　谷神星与青海省大小的比较

第六节　太阳系小天体——小行星

在太阳系天体中，除中心天体太阳、8颗行星和它们的卫星以及矮行星之外，其余天体均被归入"太阳系小天体"这一大类，其中包括小行星、彗星、流星体等，本节讨论小行星。

一、发现与命名

第一颗小行星是由意大利天文学家皮亚齐(G. Piazzi)在1801年的元旦之夜发现的，它被命名为谷神星。它是球状的，是最大的一颗小行星，矮行星这一类天体的名称诞生后，它又被升格为矮行星。

小行星是发现者有权提出正式命名的一类天体。新发现的小行星只给予暂用名，暂用名用年代和两个拉丁字母表示，年代表示在哪一年首先发现的，后面紧跟的第一个字母以半个月为期顺序表示该年中某月的上半个月或下半个月，但字母I不用，例如5月的上半月顺序为9，便是J；第二个字母则表示这半个月中被发现的第几颗卫星，但字母I仍然不用。于是2009年5月上半月发现的第16颗小行星应表示为2009JQ。由于字母Z相当于顺序数25，所以某半月中第26颗起被发现的小行星只好再用数字1，2，3的顺序继续第二个字母。小行星发现后，通过观测计算出轨道，再经过两次回归(该小行星冲日)的观测之后，可由发现者提出命名，经过国际天文学联合会小行星中心批准便获得正式命名，同时该中心还给予该小行星一个编号。例如，第2045号小行星被命名为北京，第2078号小行星被命名为南京等。

到2008年6月中旬末，已发现小行星41万多颗，已编号的约有18.9万颗，已获永久命名的有14 500多颗。估计小行星的总数在100万颗以上。

二、特性

小行星主要分布在火星和木星之间，绝大多数小行星的轨道半长径在2.17～3.64天文单位之间，这被称为小行星的主环带。但也有不足10%的小行星其轨道半长径在此范围之外。小行星椭圆轨道普遍比行星轨道的偏心率大。

在小行星中，直径在100 km以上的约有200多颗，直径在30 km以上的约有1 000多颗，直径在1 km以上的超过100万颗。只有极少数大的小行星是球形的，大多数小行星形状不规则，而且其表面往往布满了陨击坑。1991年，美国发射的"伽利略号"飞船在

飞向木星途中，拍摄了小行星加斯帕拉(Gaspra)的传真照片，这颗长轴仅为 18 km 的小行星表面布满了陨击坑(见图 5-28)。

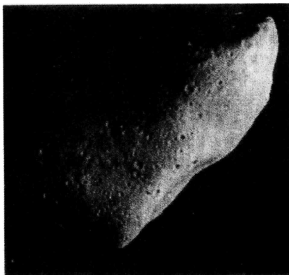


图 5-28 小行星加斯帕拉的照片

小行星也在自转，其自转周期通常为 2～16 h。有的小行星往往还有卫星相伴，1993 年，"伽利略号"飞船在飞向木星途中曾从小行星艾达(Ida)身旁飞越，拍摄到这颗长轴为 56 km 的小行星拥有一颗长 1.6 km，宽 1.2 km 的卫星(见图 5-29)。

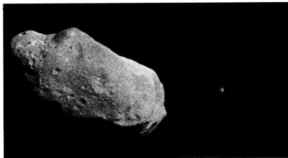


图 5-29 小行星艾达和它的卫星

三、近地小行星

有的小行星因其轨道半长径很接近 1 天文单位，或它的轨道偏心率较大，因而在绕太阳公转过程中会运行到地球附近，这种小行星称为“近地小行星”。它们受行星的额外引力作用会导致它的轨道发生变化，从而存在着撞击地球的危险性。近地小行星撞击地球的概率约为 1 亿年中发生 1～2 次。虽然这样的撞击概率很小，但由于一旦发生，将会给人类社会带来灾难性的后果，所以搜索和监视有可能撞击地球的近地小行星已成为天文学家的一项重要工作。世界上许多国家的天文台和我国的国家天文台、紫金山天文台都把近地小行星的搜索和监测列为重要研究项目，并在广泛的国际合作中开展工作。紫金山天文台在江苏盱眙建立了专门的观测基地，用 1.2 m 折反射望远镜专门搜索近地小行星。

第七节　太阳系小天体——彗星和流星体

一、彗星的发现与命名

彗星是太阳系中形状很奇特的一类天体。它突然在天空中出现时，往往有长长的尾巴，形如一把大扫帚，故俗称“扫帚星”，彩图 12 是哈雷彗星的彩色照片。彗星在远离太阳时并无彗尾，它只是在天空中恒星间移动的一个雾状斑点，有经验的观测者搜索到它便知道是一颗彗星。

有不少彗星往往是由业余天文学家发现的，他们及时向国际天文学联合会天文电报中心报告自己的发现，其中最早的发现者（至多 3 人）可荣获以自己姓氏命名的临时冠名权，如发现者先后发现多颗彗星的，可在姓氏后再加上数字，例如 1994 年彗木相撞的著名彗星就是由苏梅克（Shoemaker）夫妇和利维（Levy）共同发现的第 9 颗彗星，所以它被命名为苏梅克-利维 9 号彗星。当彗星的轨道确定后，用该彗星过近日点的年代以及该年中过近日点的先后顺序用罗马数字Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ 等给予正式名字，但实际上临时命名的名字与正式名字此后往往被不同的人任选着使用。上面是 1994 年底以前的命名规则。1995 年 1 月 1 日起，新发现的彗星由国际天文学联合会天文电报中心局统一命名，命名方式是：先用英文 Comet 的缩写词 C 表示彗星，接着加上/之后再加发现年代和用大写拉丁字母为顺序的半月符号（使用方法与发现小行星相类似，其中 I 依然不用），以及该发现者所发现的第几颗彗星，最后用括号注明发现者。例如 1996 年 1 月 30 日，日本的百武裕司（Yuji Hyakutake）发现的第二颗彗星即著名的百武彗星就被命名为 C/1996B2（Hyakutaka）。

二、彗星的轨道特征

古人往往不能区分重复出现的彗星。1705 年，英国天文学家哈雷(E. Halley)在《彗星天文学概论》一书中指出，1531，1607 和 1682 年出现的大彗星实际上是同一颗彗星，他还大胆地预言该彗星将在 1758 年回归，该预言后来得到证实，所以该彗星被命名为哈雷彗星。它是一颗沿十分扁长的椭圆轨道运行的彗星，其近日点在地球轨道之内，而远日点则在海王星轨道之外。每隔 75～76 年，它"朝拜"太阳一次，因而被我们看到(见图 5-30)。

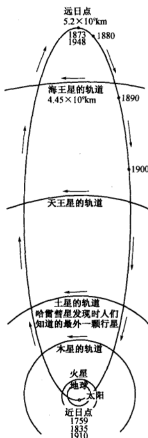


图 5-30 哈雷彗星的轨道

彗星按照它的运行周期分成三类：① 短周期彗星。彗星在椭圆轨道上绕太阳运转，其运转周期小于 200 年。② 长周期彗星。轨道周期大于 200 年，但仍被太阳的引力束缚在太阳系内，它将以极其扁长的椭圆、很长的周期绕太阳运转。③ 非周期彗星。彗星在运行过程中会受到行星的附加引力作用（称摄动），如果这种作用导致了它在轨道上的运行速度增加，以致于它在经过近日点时的运行速度达到其逃逸速度，那么该彗星将沿抛物线轨道运行；如果此时的运行速度已超过其逃逸速度，则该彗星将沿双曲线轨道运行。在这两种情况下，该彗星便一去不返，这样的彗星便称非周期彗星（见图 5 - 31），非周期彗星约占彗星总数中的 1/3 左右。

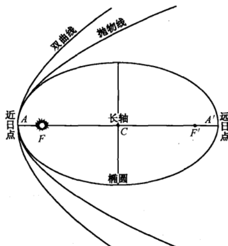


图 5 - 31　若彗星沿抛物线或双曲线的轨道运行，它便是非周期彗星

三、彗星的结构

彗星实际上是由冻结的水、二氧化碳、氨、氢、氧、一氧化碳等挥发性物质以及尘埃物质混杂而成的一团“脏雪球”，其中水冰的含量很多。在远离太阳时彗星的体积很小，当它越来越接近太阳时，受太阳热辐射的作用，它的气体和尘埃物质被不断蒸发出来，形成了彗头和彗尾两部分（见图 5 - 32），彗头由彗核、彗发和包围彗发的氢云构成，而彗尾中主要成分是气体分子、离子和尘埃粒子，它们受太阳的辐射压的作用和太阳风的驱赶，沿着背离太阳的方向延伸，或者有一定的弯曲。



图 5－32　彗星的结构

四、流星体、流星与陨星

行星际空间有许多小尘粒和块状小物体，小的只有 $1/10^6$ g，大的可达 10^5 kg 甚至更大，它们也在围绕太阳转动，称为流星体。大的流星体与小的小行星之间没有明确的质量界线。当流星体靠近地球时，受地球引力作用高速闯入地球大气，与高层大气发生摩擦，进而发热、燃烧，并使其经过路径上的大气电离，在流星体周围形成由炽热气体和冲击波组成的明亮包层，于是人们就看到了流星，单颗的流星人们常称之为偶发流星（见图 5－33）。



图 5-33　一颗偶发流星

当绕日运动的流星体质量大于几百克，被地球引力所俘获进入地球大气时，它来不及在地球高层大气中燃尽就闯入了低层大气，高速飞行中与低层大气发生剧烈摩擦，产生耀眼的光亮，并伴有沙沙声或爆炸声，这便是火流星(见图 5-34)。



图 5-34　一颗火流星

比单颗的偶发流星要壮观得多的是流星雨现象。它是构成一群的许多流星体几乎同时闯入地球大气而造成的，这种构成一群的流星体称为流星群，它沿自己的轨道绕着太阳运转。图 5-35 是 1833 年 11 月 12 日在美国波士顿地区观测到的一场壮观的流星雨。由于它们似乎都从狮子座中一点辐射出来，因此该流星雨称为狮子座流星雨。像图 5-35 那样壮观的流星雨是十分罕见的，很多情况下流星雨是一颗又一颗流星较长时间中不断地从星空中同一点(该点称辐射点)向外射出。即使是狮子座流星雨，通常也需要用望远镜跟踪该流星雨的辐射点，进行长时间曝光，才能拍摄到如图 5-36 的照片。

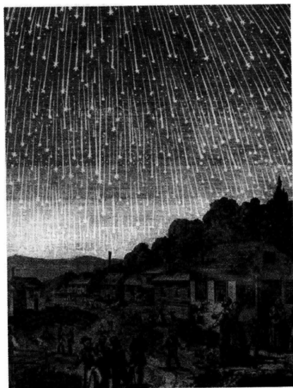


图 5-35 一场壮观的流星雨

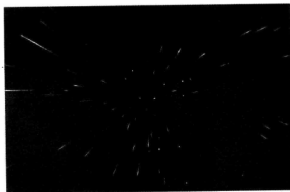


图 5-36 通常情况下拍摄到狮子座流星雨的照片(图中射出流星的中心点称辐射点)

若某一流星群绕太阳运行的轨道与地球的公转轨道相交，于是地球在每年的特定日期经过此交点时，流星群就会沿所在轨道的方向上朝着地球"奔驰"而来。图 5－37 是英仙座流星群的轨道与地球轨道相交的情况。每年 8 月 10 日，该流星群就从英仙座方向向着地球行进，该群中的流星体从英仙座中某点突入地球大气，因而形成英仙座流星雨。人们从地面上看，许多流星都从英仙座中的辐射点不时地向四面八方射出的，实际上是该流星群穿入地球大气后的一种视效应。

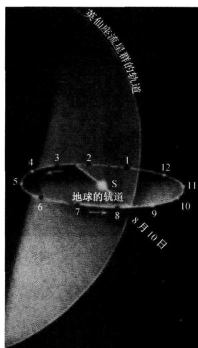


图 5－37　英仙座流星群的轨道与地球轨道相交

流星群往往是由彗星瓦解形成的，这方面最有力的观测证据是比拉彗星分裂变成流星雨的事件。该彗星在 1772 年和 1805 年都被观测到，但当时还未认识到是同一彗星。1826 年 2 月底，奥地利的比拉(W. Biela)再次发现了它，因而被命名为比拉彗星。有人还算出了它的轨道，指出它是一颗周期为 6.6 年的彗星。1846 年 1 月，它突然分裂为两颗(见图 5－38)。1852 年，这对彗星回来时彼此间距离更大。此后两次回归时均未看到，但 1872 年 11 月 27 日地球恰好穿过比拉彗星原先的轨道时，在天空中仙女座方向出现了一场壮观的流星雨，天文学家们通过计算证实这正是由于比拉彗星碎裂成绕太阳运转且与地球轨道相交的流星群造成的。

有的流星体质量相当大，与空气摩擦产生的几千度高温无法使它全部烧毁汽化，剩余部分陨落到地面上称陨星。陨星按其组成分为铁陨星、石陨星和石铁陨星三类：铁陨星也称陨铁，其主要成分是铁镍合金，平均密度在 $7.5\times10^3\sim8.0\times10^3\,kg/m^3$；石陨星是陨星中最常见的，约占全部陨星中的 92%，其主要成分是硅酸盐，只有少量的铁和镍，平均密度约为 $3\times10^3\sim3.5\times10^3\,kg/m^3$；石铁陨星中铁、镍等金属成分和硅酸盐大概各占一半左右，其平均密度约为 $5.5\times10^3\sim6\times10^3\,kg/m^3$。世界上最大的铁陨星是在非洲纳米比亚的戈巴大陨铁，重达 60 t 左右；我国乌鲁木齐市保存的新疆大陨铁(见图 5－39)重达 30 t，位居世界上已发现的陨铁中第三位。石陨星容易碎裂，不可能很大，目前世界上最大的石陨星是我国的吉林 1 号陨石(见图 5－40)，重 1 770 kg，它是 1976 年 3 月 8 日著名

的吉林陨石雨中最大的一块陨石。



图 5-38　比拉彗星分裂为二

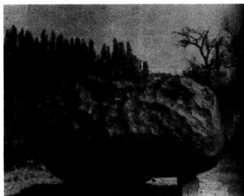


图 5-39　新疆大陨铁

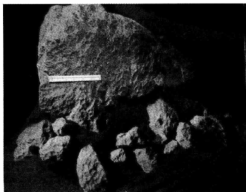


图 5-40　吉林 1 号陨石

第六章　太　　阳

太阳是太阳系的中心天体，它是一颗恒星。在它的引力作用下，太阳系其他天体环绕它运行。人们研究太阳，因为它与人类的生活息息相关，又是维系并影响整个太阳系的引力和辐射源。它是典型又最易观测的恒星，通过研究太阳可以了解恒星世界的一般规律。

第一节　概　　况

一、太阳的基本数据

太阳是恒星世界的代表。恒星的一些物理量，常以太阳的相应参量为单位，如太阳质量 $m_{\odot}$，太阳半径 $R_{\odot}$，太阳光度 $L_{\odot}$ 等等。

太阳质量。它是根据开普勒行星运动第三定律计算而得的（见第五章第一节），它的数值是 $m_{\odot} = 1.989 \times 10^{30}$ kg $\approx 2 \times 10^{30}$ kg。太阳质量是地球质量的 33 万多倍。

太阳半径。这是指太阳的线半径，要求得这个值，必须测定日地平均距离 a 和太阳半径视圆面的平均角半径 ρ，于是可用下列三角公式计算太阳的线半径，即

$$R_{\odot} = a\sin\rho \tag{6-1}$$

多年的测定结果为 $R_{\odot} = 6.955 \times 10^5$ km $\approx$ 70 万 km。太阳半径是地球半径的 109 倍，从而算得太阳体积是地球的 130 万倍。与地月距离相比，太阳的直径约为其 3.6 倍（见图 6-1）。

太阳平均密度。已知太阳的质量和体积，不难算出其平均密度为 $\rho_{\odot} = 1.409 \times 10^3$ kg/m^3。

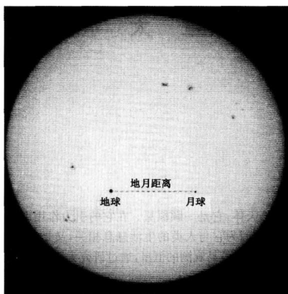


图 6-1　太阳的大小与地球、月球和地月距离的比较

日地平均距离。由于地球环绕太阳的轨道是一个椭圆，日地距离随时间改变。从数学上来看，轨道椭圆的半长径就是日地平均距离。日地平均距离以前曾经被定义为“天文单位”。1976 年以后，国际天文学联合会对天文单位作了重新定义，但在数值上与日地平均距离十分接近。日地平均距离的数值为 $a=1.495\,978\,70\times10^{8}$ km$\approx1.496\times10^{8}$ km，或者说近似等于 1.5 亿 km。

测定日地距离不如测定地月距离那么直接(见第四章第五节)。历史上，天文学家为测定日地距离曾提出了若干不同方法，并付出了大量努力。现代方法是首先测定若干行星或小行星的视差(即距离)，再利用开普勒行星运动第三定律计算日地平均距离。现代测定行星视差是用雷达测距的方法，比在地面上利用三角视差法测量更加精确。

太阳平均角半径。如上所述，日地距离随时间改变，显然，地面上所见天空中太阳视圆面的大小也是变化的。其平均值相当于在日地平均距离处的测量值，其值为 $15'59.63''$。

太阳光度。太阳光度定义为从太阳整个表面上在单位时间内向外辐射的总能量(即功率)。它的数值是 $L_{\odot}=3.845\times10^{26}$ J/s(W)。地球所接收到的太阳辐射只是同时间内太阳辐射的 $1/(2.2\times10^{9})$。

太阳辐照。它定义为太阳垂直照射在离它 1 天文单位处每平方米面积上的总辐射流。其值短期变化较大，而年际变化较小，平均值为 1 367 W/m^{2}。这个数值是在人造地

球卫星上安装性能良好的辐射计测定的。

太阳光度正是由太阳辐照求得的，即太阳光度等于太阳辐照乘半径($r=1$ 天文单位)的球面的总面积($4\pi r^2$)。

太阳表面温度。把太阳辐射看做为黑体辐射，则可根据太阳光度，按相关的物理定律算出太阳表面温度(称为表面有效温度)，其值为 $T_\odot = 5\,770$ K。

太阳表面重力加速度和逃逸速度。根据太阳的质量和半径，按照牛顿万有引力定律容易算出太阳表面加速度 $g_\odot = 274$ m/s^2，及太阳表面逃逸速度 $v_{e\odot} = 617.7$ km/s。

二、太阳的自转

太阳是一个处于高温等离子体状态的气体球，它的自转不同于刚体自转，而表现为不同纬度处不同的自转角速度。这种自转方式称为较差自转。

定义通过太阳中心与太阳自转轴垂直的平面为(太阳)赤道面，定义日面纬度从太阳赤道起计量，向北为正，向南为负，从 0°到 90°。天文学家通过观测日面上的某些特征物，如黑子、暗条等，在日面上随太阳自转而移动，或借助光谱分析，测定了不同纬度处的太阳自转周期。赤道处自转最快，周期最短，为 25.38 天，相应的自转线速度为 2 km/s。纬度越高自转越慢，在纬度 75°处自转周期为 33.4 天，在太阳的极区，自转周期为 35 天(见图 6-2)。

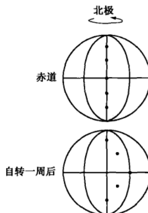


图 6-2　太阳的较差自转(原先位于同一子午线上的一列黑子，在太阳自转一周以后已位于不同的子午线上了)

太阳的各项基本数据概括于表 6-1。

表 6-1 太阳的基本资料

质量 $m_\odot$		1.989×10^{30} kg	表面温度(光球)	5 770 K
半径 $R_\odot$		6.955×10^{5} km	表面重力加速度(光球)	274 m/s^2
平均密度 $\rho_\odot$		1.409×10^{3} kg/m^3	表面逃逸速度	617.7 km/s
光度 $L_\odot$		3.845×10^{26} J/s	中心密度	1.513×10^{5} kg/m^3
自转(恒星周期)	赤道	25.38 天	中心温度1.57×10^{7} K	
	纬度 75°	33.4 天	中心压力2.33×10^{16} Pa	
	极区	35 天	年龄5×10^{9} 年	

三、太阳的分层结构

天文学家观测太阳，看到的是它的表面状态，但是这也反映了太阳内部的结构和状态。他们借助已知的物理定律，根据观测资料，建立恒星内部结构模型，从而探求它的分层结构和各层内的密度、温度、压力、光度等物理特性随半径的分布。整个太阳，从物质状态来说一般分为 4 层，即核反应区、辐射区、对流层和大气(见图 6-3)。

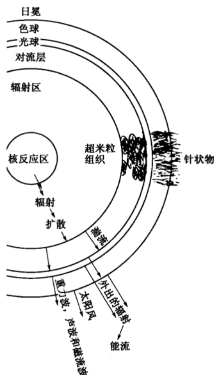


图 6-3 太阳结构剖面图

(一) 核反应区

太阳的核反应区位于太阳的核心区域，半径约为太阳半径的 0.25。由于天体的物质分布总是向核心高度集中，根据理论推算，太阳中心的物质密度约 1.51×10^{5} kg/m^3。因而，太阳核心区域的体积虽然只占整个太阳的 1/64，却集中了 0.5 $m_\odot$。中心压强达 2.33×10^{13} kPa (约相当于 2.30×10^{11} 大气压)，且温度高达 1.57×10^{7} K。作为太阳能源的热核反应主要集中在这个区域内进行，它提供了太阳所产全部能量的 99%。能量主要以高能 γ 射线光子的

形式向外释放。

（二）辐射区

核反应区的外面一层称为辐射区，其范围从 0.25～0.8 $R_{\odot}$，密度和温度从内向外快速降低。在 0.8 $R_{\odot}$ 的外边缘，理论上推算的温度是 1.29×10^{6} K，压强是 1.32×10^{9}kPa，密度是 76.6 kg/m^{3}。

从核反应区产生的高能 γ 射线光子，进入这个区域以辐射转移的方式向外传输。所谓辐射转移是：物质吸收光子，然后辐射一次，这时光子的能量减小，频率降低（波长延长），经过这种无数次的吸收再辐射，由内向外逐渐地依次变为 X 射线、极紫外、远紫外、紫外、可见光光子，最后以可见光光子和其他形式辐射出来。如果没有辐射区物质的作用，太阳将只是一个发射高能射线的星球。

（三）对流区

辐射区之外是对流区，或称对流层，其范围从 0.8 $R_{\odot}$ 到光球底部，即太阳的边缘，密度和温度从内向外进一步降低。在这一层内，物质的上下径向对流运动十分强烈，把内部的巨大能量通过机械传输的方式，大部分传输到光球的底层，并通过光球向外辐射出去。物质在流动的过程中产生湍流和噪声，这种噪声是一种低频声波，它们也向外传输能量。

此外，由于太阳本身在做较差自转，在对流层内引起了大尺度的环流运动。环流和对流的联合作用，把太阳内部的物质带到太阳表面，也能把太阳表层的物质输送到对流区的底层，甚至更深的内部。许多日面现象，如米粒、超米粒、黑子等，产生于对流层，而且太阳外层大气的一些活动现象，其动力和能源也来自于这一层。

（四）太阳大气

这是太阳的最外层，也是可见的层次。整个大气层从下层往上又可分为性质迥然不同的 3 层：光球、色球和日冕。

光球是人们直接看到的太阳表面所在的那一层，厚度从表面往下 100 km 到表面之上 525 km 高度处。太阳是一个气体球，它没有明确的表面，太阳表面是人为定义的。设想我们从太阳大气外向太阳投去一个光束，它通过越来越加密的大气而被逐渐吸收，一当它到达 100%被吸收的深度，那么该处被定义为太阳表面。在物理学上称这里为“光深等于 1”，用$\tau=1$ 表示。光球是太阳大气的底层，是太阳大气温度最低也是密度最大的层次，在整个光球层内温度随高度而降低。太阳的光能几乎全部来自光球。太阳的光谱也是在光球内

形成的。太阳辐射的约 99.9%的能量集中在 $2.0\times10^2\sim1.0\times10^4$ nm 的波段之内。

色球位于光球之上，是太阳大气的中层，一般取太阳表面之上 525～2 100 km，即其厚度约为光球之上 1 600 km。其中物质远比光球稀薄，温度随高度而升高。按温度的高低又分为低色球、中色球和高色球 3 层。它的辐射只及光球的几千分之一，故平时看不到色球，只有在日全食的短暂时间里才显真容。

日冕是太阳大气的最外层。在色球层顶部到日冕底部之间还有一个过渡层。这是这两层之间质量和能量流动的分界层，温度从几万 K 陡升至百万 K。日冕延展到几倍太阳半径甚至更远，物质极其稀薄，温度高达 2×10^6 K。它主要由质子、高次电离的原子和自由电子组成。它的可见光辐射仅为光球的 10^{-6}，因此平时也看不到，仅在日全食时才能看到。图 6-4 展示太阳大气温度在大气的各层内随高度 h 的变化，太阳各层的数据概况见表 6-2。

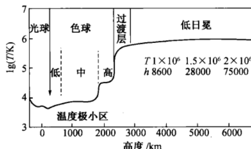


图 6-4 太阳大气温度随高度的变化

表 6-2 太阳各层次概况

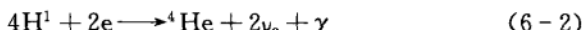
分层名		范围/$R_\odot$	质量/$m_\odot$	温度/K	压强/Pa	密度/($\times10^3$ kg/m^3)	产能($L_\odot$)
核反应区		0～1/4	50%	$1.57\times10^7\sim8.77\times10^6$	$2.33\times10^{16}\sim3.35\times10^{15}$	151～28.72	99%
辐射区		1/4～5/4	49.9%	$8.77\times10^6\sim1.29\times10^6$	$3.35\times10^{15}\sim1.32\times10^{12}$	28.72～0.076 6	1%
对流区		1/5～约 1	0.1%	$1.29\times10^6\sim6.52\times10^3$	$1.32\times10^{12}\sim1.207\times10$	$0.0766\sim2.77\times10^{-7}$	～0%
大气	光球	约 625 km	～0%	$6.52\times10^3\sim4440$	0.13～0	$2.77\times10^{-7}\sim4.87\times10^{-9}$	～0%
	色球	约 1 600 km		$4.56\times10^3\sim1\times10^4$	～0	$4.87\times10^{-9}\sim1.17\times10^{-13}$	～0%
	日冕	约几个 $R_\odot$		$1\times10^4\sim2\times10^6$	～0	$1.17\times10^{-13}\sim$	～0%

四、太阳的能源

(一) 热核聚变反应

太阳已经形成了 50 亿年,是什么能源维持着太阳如此长久的强烈辐射呢? 在核反应理论出现之前,人们基于固有的物理学和化学理论提出过几种假设。其中最有效的数收缩假说,认为引力势能转化为热能,但也只能维持几千万年。德国物理学家魏茨泽克(C. F. Weizsäcker)和德裔美籍物理学家贝特(H. A. Bethe)先后于 1937 年和 1938 年提出了由氢聚变为氦的热核反应理论,终于圆满地解决了太阳(包括恒星)的能源问题。贝特因而获得了 1967 年诺贝尔物理学奖。

太阳和大多数恒星内部的热核反应主要分两类:质子-质子反应和碳氮循环。在前一类反应中,单个质子(氢核)逐次结合,产生中间产物氘(氢的同位素)和氦 3(氦的同位素),两个氦 3 核结合产生氦核和 2 个质子。在后一类反应中,氢核与存在于介质中的碳核结合,产生中间产物碳的同位素和氮的同位素,它们逐次与质子结合最后生成碳核和氦核;碳和氮在反应中起了催化剂的作用,它们本身既不增加又不减少,但导致了反应速度的加快。在这两类反应中都同时产生正电子、电子中微子和大量能量(其形式为 γ 光子),但正电子会与周围物质中的电子发生湮灭产生 γ 光子。总的效应可用下式概括:



$$4H^1 + 2e \longrightarrow {}^4He + 2\nu_e + \gamma \qquad (6-2)$$

式中 e 为电子,ν_e 为电子中微子。

上式右边产生的能量来源于反应后物质的质量亏损,即这些质量转化为能量。上列一次反应中的质量亏损为 4.8×10^{-26} g。爱因斯坦的质能关系式给出

$$E = mc^2 \qquad (6-3)$$

式中 E 为能量,m 为质量,c 为光速。按照此式不难算出,这份质量相当 4.3×10^{-12} J。也能由此算出,在上述热核反应中,每损失 1 kg 氢释放出 6.4×10^{14} J 的能量,而在太阳核心每秒约有 6.3×10^{9} kg 的氢通过热核聚变反应转化为氦。这自然导致太阳质量减损,减损率为 6×10^{-14}/a。

太阳在进行稳定的核反应,标志着它处于主序阶段。这时由核反应产生的向外的巨大辐射压力与向内的巨大引力相平衡;由核反应产生的巨大热量与通过太阳表面向外的辐射相平衡。

实际上在核反应区内核聚变反应只能发生在温度足够高的区域,那里只有 0.1 $m_\odot$ 的氢可供反应,而当这些氢消耗殆尽时,反应便难以为继。核反应区内反应停止后,太阳就会向

红巨星演化(见第七章第二节)。而从以上叙述可知,0.1 $m_\odot$ 的物质可转化的能量是:

$$6.4\times10^{14}\,\mathrm{J/kg}\times2\times10^{30}\,\mathrm{kg}\times0.1=1.28\times10^{44}\,\mathrm{J}$$

太阳的总辐射功率是 3.845×10^{26} W,因此可以推算出太阳作为稳定恒星存在的寿命是

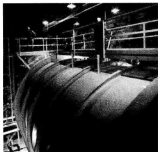
$$\frac{1.28\times10^{44}\,\mathrm{J}}{3.845\times10^{26}\,\mathrm{W}}=3.33\times10^{17}\,\mathrm{s}\approx10^{10}\text{年(即 100 亿年)}$$

太阳作为稳定的恒星已存在了 50 亿年,因此,它现在正处于中年,还有约 50 亿年的寿命。当太阳作为稳定恒星存在的寿命终止的时候,上述两种平衡也就终结了,太阳将进入新的演化阶段。

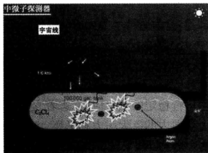
(二) 太阳的中微子问题

在氢的热核聚变反应中释放出大量中微子。中微子是一种不带电、静止质量几乎为零、以接近光速传播、穿透力极强的基本粒子。中微子从太阳核心区穿越出来,如果能够捕获中微子,就能得到关于太阳内部的信息,检验太阳内部结构理论和核反应理论。

1967 年,美国科学家设计制造了一个中微子探测器。在南达科他州霍姆斯太克一个深达 1 600 m 的废金矿中安装了一个装置,内装 3.8×10^5 L 四氯化二碳液体,作为探测中微子的仪器(见图 6 - 5)。该仪器之所以要安装在这么深的地下,是为了屏蔽宇宙射线中其他粒子的干扰,因中微子能穿透地层,而其他粒子则不能。中微子与化合物中氯的作用会生成容易探测的放射性氩。1978 年公布的结果显示,探测到的中微子流量仅是理论预测值的 1/3。这一结果在科学界引起轰动,人们称之为"中微子失踪之谜"。人们难以放弃在其他许多方面已很成功的太阳内部结构模型,因而长期以来成为科学界的悬案。



(a) 中微子探测器外形



(b) 中微子探测器剖面图

图 6 - 5 美国霍姆斯太克中微子探测器

1987 年，日本科学家在日本岐阜县神冈町建立了“超级神冈”地下探测器，1996 年扩建。在地下 1 km 的废弃锌矿矿井中，安置了一个装满 5×10^7 kg 纯水的容器，用 1 万多只光电倍增管探测中微子穿越时，以极小的概率击中水分子产生的闪光。1998 年 6 月，日本科学家宣布发现了中微子的“振荡”。原来中微子有三种类型，即电子中微子、μ 子中微子和 τ 子中微子。所谓中微子振荡是中微子在传播过程中会互相转换类型。由此人们考虑，从太阳内部核反应产生的是电子中微子，在从太阳来到地球的过程中，有 2/3 的电子中微子转换成了其他两种类型的中微子。但是直到当时，地球上的探测器都探测不到另外两种类型的中微子。神冈的“超级”探测器还证实了中微子在宇宙中数量巨大，它可能是暗物质的主要成分之一，对宇宙的演化起到举足轻重的作用。

2001 年美国、加拿大等国的科学家联合在加拿大的萨德伯里建立了一个装备新型探测器的中微子观测站，容器内装置 10^6 kg 重水，可以有效地探测另两类中微子，并与电子中微子区别开来。经过两年的探测，已经得出可信的结论，足以说明太阳内部核反应理论得出的中微子数目是对的。从而解决了“中微子失踪谜案”。

第二节　太阳大气

一、光球

光球是太阳大气的底层，是人们可直接观测到的部分。重要的太阳活动或发生在这里，或与它相关。验证关于太阳结构的任何理论，都离不开对太阳的观测。

（一）光球的辐射

1666 年，牛顿发现太阳光通过三棱镜后分解成红、橙、黄、绿、青、蓝、紫的连续彩色光带，这是天文学上第一次获得天体的光谱。但是这一发现的意义很长时间未被充分认识。1814 年，德国光学家夫琅和费（J. Fraunhofer）用他发明的分光镜观测到太阳连续光谱中的谱线（见图 6－6）。他用分光镜观测恒星光谱，发现不同恒星有不同的谱线，后来这种谱线就称为夫琅和费线。19 世纪 50 年代末，德国化学家本生（R. W. E. Bunsen）和物理学家基尔霍夫（G. R. Kirchhoff）合作，开展了大量光谱实验，发明了根据物质光谱判断化学元素的光谱分析术。其原理即为由后者总结的基尔霍夫定律：① 每种化学元素都有其特征光谱；② 每种元素都可以吸收它能够发射的谱线。基尔霍夫还指出炽热的固体、液体以及炽热、高压下的气体都发射连续光谱；炽热、低压下的气体发射离散

的明线光谱(发射线);能产生连续光谱的光线照射到温度相对较低的炽热、低压的气体上,产生叠加在连续谱上的暗线谱(吸收线),且这些暗线的排列与上述明线一致。

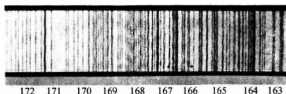


图 6-6 夫琅和费用分光镜所观测到的太阳光谱

根据现代的太阳光谱资料(彩图 13),可以认证太阳(光球)的各种元素及其丰度和它的物理性质。现在已经认证出的元素有 83 种。这些元素的含量相差很大。按质量计,最丰富的元素是氢(78.4%)其次是氦(19.8%),其余元素的含量都很低,主要有氧、碳、氮、镁、硅等。

(二)"米粒"组织

如果我们用望远镜观测太阳精细到角秒的尺度,会察觉太阳表面并不具有光滑的形态,能看到米粒状的图像(见图 6-7)。它们呈现为一些较暗的区域包围着较亮的区域。暗区其实并不暗,只是比亮区温度较低,与亮区比较之下显得暗些。米粒组织的典型尺度约 1 000 km 长,最小约 400 km,最长可达 3 000 km。米粒组织的图像随时间改变,每隔 5～10 min 就出现一个新图像。

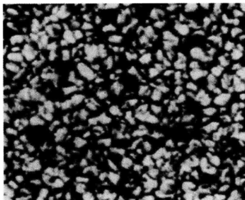


图 6-7 太阳表面的米粒组织

米粒组织揭示了太阳表面之下我们不能直接看到的结构。由于光球的底层实际上就是对流层的顶部，米粒组织的本质是对流气体的循环单元。较亮的区域是下部升起的较热气体，较暗区域则是向下回流的较冷气体，后者向下流去，以填补上升的气体（见图6－8）。

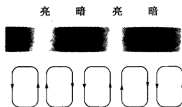


图6－8　米粒组织和对流区

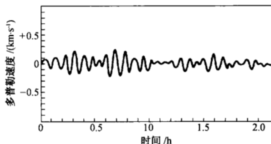


图6－9　太阳的振荡

（三）太阳振荡

太阳表面除许多局部的活动以外，还有光球各部分大范围的起伏振荡（见图6－9）。这种振荡的主要周期为5 min，振幅约25 km，速度平均约300 km/s，所以又常称为太阳的五分钟振荡。在振荡过程中，日面上$1\times10^3\sim5\times10^4$ km区域内的物质一起作整体的上升和下落。实际上这类振荡的周期有许多种。其起因是：从太阳内部向上运动的声波到达表面被反射回去时，由于内部密度和压力增大而使波弯折，又转回表面，从而声波在表面与内部之间反复传播，有可能增强和共振。这类振荡反映了太阳不同层次结构内波动传播的不同"性状"，因此它们为研究太阳内部结构提供了又一条可靠的途径。这一领域形成了研究太阳的一个新的分支学科：日震学。正如地球物理学家利用地震探测地球内部各种变化一样。而且由此扩展，在恒星物理学的领域也形成了星震学的研究方向。

（四）太阳边缘的观测现象

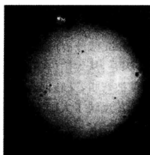
关于光球有一个有趣的问题，即我们可以看到太阳明显的边缘。前面说过，太阳是一个气体球，它的密度从中心向外连续下降，而没有明显边界。这与地球、月球之类的星球具有固态表面截然不同。那么为什么我们还能看到太阳确定的边缘呢？参看图6－10，图中有两条视线，视线"1"穿越光球下部，那里太阳大气浓密，不透明度很高，视线"2"穿越上空，那里太阳大气比较稀疏，不透明度很低。这里有两个原因共同起作用：① 穿越

太阳大气的路径缩短；② 视线通过的区域密度更稀。从理论计算可知，从一条视线改变到另一条视线使不透明度按与日心距的指数规律下降。因而，在光球内部随着日心距增加，太阳大气的不透明度急剧下降，太阳大气从十分不透明到十分透明的转变，发生在很小的区域，而我们由于受分辨能力的限制，不能感知在这么小的区域内的逐渐变化，这样边缘就显得十分明显。

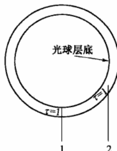


图 6－10　通过太阳边缘的视线

观测太阳边缘还能看到称为“临边昏暗”的现象，即太阳圆面的亮度在边缘明显减弱。这可由图 6－11 说明。图 6－11(a)是一张太阳的白光照片，可见太阳视圆面边缘比中间较暗；图 6－11(b)表示通过我们指向太阳视圆面中心的视线(视线“1”)的太阳剖面(这个平面与图 6－11(a)的平面垂直)，另一条视线(视线“2”)在这个剖面上，但穿越边缘。视线“1”直达光球底部，那里的温度是光球层内最高的，因而显得更亮。视线“2”首先遇到的是光球的高层大气，那里的温度低于底部；它也能遇到底部光线，但是这时来自底部的光线要经过厚得多的大气层，被吸收减弱很多。于是穿越太阳边缘的视线“2”，所感受的亮度比到达中心的视线“1”要低。



(a) 太阳的白光照片



(b) 指向太阳中心和边缘的两条视线，视线“1”在太阳大气内穿越 τ=1 的深度时已达极明亮的太阳表面，而视线“2”则没有

图 6－11　日面的临边昏暗现象及其解释

二、色球

色球是太阳大气的中层，平时不易观测。日全食时，月球挡住了明亮的光球，日轮边

缘显露出一层玫瑰红的绚丽色彩。色球层的名称即来源于此。20 世纪 30 年代，天文学家开始利用专门的色球望远镜观测色球，对它的研究便广泛而持久地开展起来。

（一）闪光谱和单色光观测

在日全食的食既和生光的瞬间，月球视圆面刚好把整个太阳视圆面遮住，薄薄的色球层呈现为狭窄的闪亮圆弧，这时拍摄的色球光谱称为闪光谱（见图 6-12）。有趣的是每条谱线都呈现圆弧的弯曲形状。色球层是稀疏透明的气体，因此闪光谱是发射光谱，主要是氢、氦、钙、铁、稀土元素等的一系列发射线，而没有吸收线。其中氢的红光波段辐射的谱线（波长 656.28 nm，天文学上称为 Hα 线）最强，因此使色球呈红色。闪光谱与光球的吸收线谱有很大差别，这是由于这两层内的物理条件不同：色球的物质密度和压力比光球低得多，而温度却高很多。但光谱分析确定色球层的化学元素组成基本上与光球层相同。这是由于太阳大气的物质在不停地流动，使得各部分物质经常在相互混合。

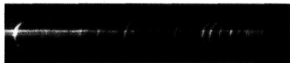


图 6-12 日全食时的闪光谱

在望远镜上加上滤光片（或特制的滤光器），只让 Hα 线的红光通过，得到太阳的单色像。通过 Hα 线能看到太阳表面以上 1 500 km，可以研究色球的大尺度结构（彩图 15）。在这张照片上我们可以看到比在光球上的米粒组织尺度更大的超米粒组织。

（二）色球的结构和现象

色球层是一个充满磁场的等离子体层，其厚度约为 1 600 km。它的温度分布与光球层的正相反，即随高度的增加而温度逐渐上升，而且温度的增加率也随之上升。通常按平均温度随高度的分布把色球分为低层、中层和高层，低色球层与中色球层的分界温度约为 6×10^3 K，而中色球层与高色球层的分界温度则约为 10^4 K。实际上色球内并没有明显的边界，而且其物质分布本来就很不均匀。

色球层是很不均匀的，呈现各种复杂的构造和活动现象，它们有：色球网络、针状物（日芒）、冲浪、日珥和暗条以及耀斑等。

（1）色球网络。色球的单色像呈现由亮斑和暗斑组成的多边形网络状结构，网络中纵向磁场较强。网络链围住的单元大小约 3.0×10^4～3.5×10^4 km，这称为超米粒组织。

超米粒如同光球上的米粒，只不过尺度大得多，平均寿命为 19～21 h。超米粒中央的物质向上流动，而边缘的物质向下流动，这些运动能够由谱线的多普勒位移测定。在高分辨率的观测中还能发现更复杂的精细结构(见图 6－13)。



图 6－13　色球网络

(2) 针状物(日芒)。以高分辨率的单色光观测色球，可清晰地看到它的边缘呈现许多锯齿状的"火焰"，称为针状物或日芒(见图 6－14)。它们是从宁静色球网络向日冕喷射的细长喷流，从色球中层开始，向上可延伸超过 1×10^4 km；而宽度仅约 800 km，向上运动速度约 20～25 km/s，寿命约 5～10 min。针状物的数量随高度增加而减少，估计色球层中约有 25 万个针状物。

(3) 冲浪。这是色球层中又一种物质抛射现象(见图 6－15)。实际上，冲浪起源于光球中的活动区域，在日面边缘处，冲浪表现为一个小而明亮的小丘，顶部似尖钉状向外急速增长，其底部几乎在黑子之中。冲浪上升的高度各不相等，小的只有几百千米，而大的则达 5×10^3 km，最大的竟可达 1×10^4～2×10^4 km。冲浪的寿命多为 10～30 min，常以约 1 h 间隔抛射。高分辨率的观测资料显示冲浪有细小的纤维束结构，每条纤维间相距几角秒，以整体性地一起发亮和运动。它们的运动与针状物的匀速运动不同，而是以一定的加速度上升，在顶部可达 100～200 km/s 的速度。被抛射的物质在到达最高点后，又以加速度落回日面。一般认为，冲浪活动取决于活动区的强磁场。

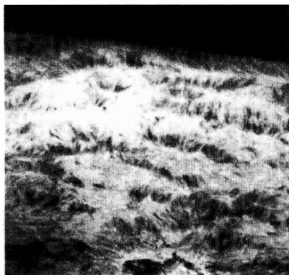
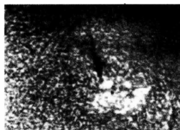


图 6 - 14　针状物



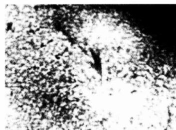


图 6 - 15　色球层中的物质抛射——冲浪(同一日面区域相隔约 1 h 的变化)

色球中还有诸如光斑、谱斑、日珥、耀斑等强烈的活动现象。将在以后分别介绍。

三、日冕和太阳风

在日全食的短暂瞬间,月球遮住了光球的强烈辐射,在日轮周围显露出大片洁白的微弱光辉,这就是太阳大气的最外层——日冕。与光球和色球不同,日冕的延伸范围要广得多,可达几个太阳半径,而且它向外面的行星际空间伸展,之间没有一个固定明确的分界面。日冕物质极为稀疏,但温度却达 1×10^6 K,高温的日冕物质不断地高速吹送到

行星际空间，形成了太阳风。

天文学家发明了日冕仪，在非日食时观测日冕，主要结构是在望远镜中装置一个圆片挡住光球的光线，同时尽可能地削弱散射光。为此，仪器安装在海拔很高、大气稀薄清澈的地方，或放在航天器上在大气外层进行观测。此外，射电观测也是研究日冕的重要方法。

（一）日冕的发射机制

日冕的形态随太阳活动的强弱而改变。在太阳活动极大期，日冕呈圆形；在活动极小期，日冕呈近椭圆形，赤道区比两极区延展得更远（见图 6－16）。



(a) 太阳活动极大期的日冕　　(b) 太阳活动极小期的日冕

图 6－16　日食时日冕的两张图像

由光学观测可知，日冕所产生的发射包括三个部分：① 直接来自高度电离的物质的发射。由于日冕处于高温和低密度的条件，这种条件更容易产生高度电离的状态，高温提供了电离所必需的能量，而低密度表明不容易发生碰撞而引起复合。这种发射仅占日冕全部发射的 1%。② 来自日冕内的大量自由电子（即从原子内电离出来，游离在空间的电子）对来自光球的光线产生的散射。③ 第三个部分其实不是太阳的一部分，它来源于行星际尘埃对来自光球的光线产生的散射。

（二）日冕的活动和形态结构

与色球一样，日冕也可以依据物理特性分为内冕、中冕和外冕三个部分。日心距离 $R<1.3R_{\odot}$ 的区域称为内冕，$1.3R_{\odot}<R<2.3R_{\odot}$ 的区域称为中冕，$R>2.3R_{\odot}$ 的区域称为外冕（它一直可以延伸到 $5R_{\odot}$ 以上）。

与色球相同，日冕是相当不均匀的，它也呈现出一些形态上的结构特征和活动（彩图 16），主要有冕流、极羽、冕环、冕洞、X 射线亮斑和日冕物质抛射等。

（1）冕流。日冕上明亮的束状延展结构称为冕流。一般冕流的长度约 1～2 $R_\odot$，宽度约 0.1 $R_\odot$，最长时外部可延伸到 10 $R_\odot$ 以上。冕流标志着磁场和离子离开太阳的路径。冕流可持续几个太阳自转周期。

（2）极羽。极羽是出现在太阳高纬度区的细长的亮束，呈羽毛状从极区散开，故而得名。其分布类似于偶极磁场的磁感应线，寿命约 15 h（见图 6－17）。

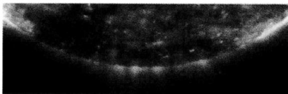


图 6－17　极羽

（3）冕环。日冕中亮的环状结构，在可见光、紫外线和 X 射线波段都能观测到，典型大小约 1.0×10^3 km$\times1.0\times10^4$ km，从几天到两星期间发生变化。图 6－18 展示在 X 射线波段拍得的冕环照片。

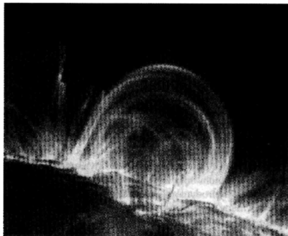


图 6－18　在 X 射线波段拍得的冕环照片

（4）冕洞。冕洞是日冕中的辐射很弱、比背景暗的区域。冕洞的尺度很大，通常可占太阳面积的百分之几，但是密度却相当低。冕洞的寿命非常长，一般可达 5～6 个太阳自转周期。而且与太阳风密切相关。图 6－19 展示在 X 射线波段拍摄的日冕照片，其上黑色区域就是冕洞。

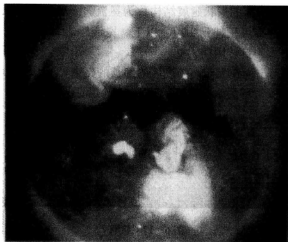


图 6-19 在 X 射线波段拍得的冕洞照片

(5) X 射线亮斑。在紫外和 X 射线的日冕像上有一些亮斑温度超过 2.5×10^6 K，延展 $5\times10^3\sim2\times10^4$ km。亮斑的寿命为 2～48 h，估计每天可出现约 2×10^3 个。

(6) 日面物质抛射。图 6-20 是一张难得一见的日面物质抛射的照片，其中除了可见规模极其壮观的日面物质抛射景象外，同时还拍到了昴星团、水星、金星、木星和土星。

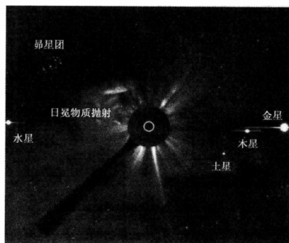


图 6-20 日冕物质抛射

日冕经常出现激烈的瞬变事件，物质呈环状、泡状、云状等增亮结构，以速度约 300～

1000 km/s 向外运动，这称为日冕物质抛射。一次事件抛射物质的质量为 $10^{12}\sim10^{13}$ kg，能量为 $10^{23}\sim10^{25}$ J。这类事件常与耀斑或爆发日珥相伴。关于导致以上日冕活动的能量来源可能有几种机制，一是靠近太阳表面的振荡发出超音速的声波(激波)进入太阳上层大气，二是太阳磁场的活动加热过程，但完整的理论尚未建立。

(二) 太阳风

太阳风是太阳向行星际空间发射的粒子流。太阳风的主要成分是电子和质子，还有氦离子以及少量的碳、氮、氧等重元素的离子。太阳风的“风源”是冕洞。原来，日冕内从里向外的压力很大，其中的粒子所受的引力不足以抵抗这种压力，因而从冕洞中向外散逸。

太阳风在其从太阳到地球的 5～10 天的行程中还在加速。在地球轨道上，它的速度是 400～450 km/s，每立方厘米体积中的粒子数为 5～10 个，还有微弱的磁感应强度。太阳风在经过地球轨道后继续向外太空“吹”去，一直可达到太阳系之外，与其他恒星“吹”出的同类星风相混合。太阳风在“刮”过各大行星的时候，会与它们的磁层发生作用。

太阳风对地球的影响是显然的。首先作用于地球的磁层，使地球磁层的形态和空间范围发生显著改变，并随太阳风的强弱而变化；同时在地球周围造成了辐射带。此外，由于地球磁场有效地起了屏障作用，太阳风中的带电粒子不能到达地球表面，但是它们能沿着磁感线运动到达地球南、北两极。这些高速带电粒子与地球两极上空的大气分子和原子相碰撞，激发出绚丽的极光。当太阳活动增强时，极光显得更加宽广。大气中带电粒子丰度的上升也对无线电形成干扰。

太阳风也是造成彗尾背向太阳的原因之一，太阳风驱使彗头内的离子向彗尾方向流动，形成等离子体彗尾。超声速的太阳风与彗星的气体发生复杂的作用，会产生各种形态的彗尾。

太阳风造成的太阳质量减小是微不足道的，一般估计为 $10^{-14}\ m_{\odot}/\mathrm{a}$，质量减损率约太阳辐射损失的 1/6。

第三节 太 阳 活 动

太阳是一颗相当稳定的恒星。太阳虽然不断地发出各种辐射，但它整体上保持着基本相同的状态，其质量、半径、光度等物理量在很长的时期内几乎维持不变。但是它的一些局部区域却常发生规模不同，有时很剧烈的变化，称为太阳活动。太阳活动具有周期性，最明显的有约 11 年的活动周期和约 22 年的磁周期。

太阳活动现象有多种，最显著的现象是日面上的暗斑和亮斑，它们分别称为黑子和光斑，还有在日面边缘冒出的“火焰”（称为日珥），而最剧烈的活动是耀斑。各种活动现象出现的区域和性质虽然有所不同，但常表现出具有群发性特征，反映了各种活动现象之间的内在联系和整体性质。

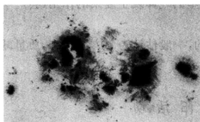
太阳活动的强弱对地球的气候变化、磁场、电离层、生物活动乃至人类健康等有重要影响。专门研究这类影响的学科称为日地关系学，将在下节作概要介绍。

一、黑子和光斑

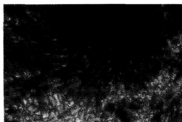
黑子是太阳光球上的暗黑斑点，是最先观测到的日面现象之一，也是太阳活动的最基本的标志。在太阳活动强烈的时候，黑子增多，反之则减少。

（一）黑子的形态和结构

太阳光球上的黑子大小不一[见图 6－21(a)]，直径的范围在 $3.6\times10^3\sim5.0\times10^4$ km之间。统计表明，黑子的寿命与大小有关，黑子越大，寿命越长，通常寿命的范围在一星期至几个月之间。黑子由本影和半影组成。本影是黑子中间特别暗黑的部分，半影包围本影四周，比较明亮。本影之所以显得暗黑，原因在于热量对流传输受阻，本影只能发射太阳平均热流的 20%，于是它的温度（约 4.5×10^3 K）显著地低于周围的温度（约 6.0×10^3 K）。实际上一个大黑子的亮度不亚于 10 个满月的亮度。半影是本影与光球之间的过渡区域，常有复杂的精细结构[见图 6－21(b)]：有许多大致上径向排列的纤维状的结构和形态各异的旋涡状结构。半影的光度约可达光球的 75%。



(a)成群的黑子



(b)黑子的本影和半影

图 6－21　太阳黑子

多数黑子是成群地出现的，许多单个黑子也会发展成为一群。一个黑子群包含的黑子少则几个、十几个，多则几十、上百个。但一般说来，每个黑子群中有两个主要黑子，群

西部(右边)的称为前导黑子,东部的称为后随黑子,两者的磁极通常相反。在同一太阳活动周期(11年)内,无论前导黑子还是后随黑子,在同一(南或北)半球上,它们的极性始终不变,但在不同半球,极性正好相反。到了下一个活动周,南、北半球的前导黑子和后随黑子的极性都反过来了。例如,在第22活动周,太阳北半球的前导黑子总是磁南极,后随黑子总是磁北极;而南半球则相反,前导黑子总是磁北极,后随黑子总是磁南极。但是到了第23活动周,太阳北半球的前导黑子总是磁北极,后随黑子总是磁南极;而南半球的前导黑子总是磁南极,后随黑子总是磁北极。因此,从黑子极性分布特征来说,黑子活动的磁周期是通常活动周期的两倍(22年)。

(二) 黑子数和黑子面积

人们早就发现日面上的黑子数目有周期性的消长变化,为了研究黑子活动规律,需要给予统计上的定量指数。1848年,瑞士苏黎世天文台的天文学家沃尔夫(R. Wolf)提出了一种统计方法,称为黑子相对数或沃尔夫(黑子)数。这种记录的黑子数实质上是某种加权平均值,其定义是

$$R = K(10g + f) \tag{6-4}$$

式中:g是某一天日面黑子的总群数;f为同一天里单个黑子的总数;K为换算因子。由于各天文台所用的观测仪器、观测技术、观测者的经验和观测时的天气条件等因素不同,观测后所得的结果不可能相同,对不同的天文台要取不同的K值。沃尔夫取定苏黎世天文台的$K=1$,其他天文台的K值可与黎世天文台的长期比较得出。现在综合世界各天文台的资料而得出每天的国际黑子相对数,及从1849年开始有黑子数连续的月均值和年均值。

太阳活动的强弱不仅与黑子数的多少有关,而且也与黑子面积的大小有关。1874年,格林尼治天文台开始测量黑子的总面积,把不同日面经纬度处的数值归算到日面中心,以太阳面积的10^{-6}为单位计量。观测资料的统计显示,每天的黑子相对数与黑子面积数没有什么明显关系,但年均值则有大致确定的关系。

(三) 黑子活动周期

由长期积累的观测资料发现,黑子相对数的年平均值大致按平均周期为11年而变化。从图6-22可见,黑子相对数年均值的变化,周期性地出现极大年(峰年)和极小年(谷年)。两个极大(或极小)的时间间隔有短于9年的,也有长于13年的,周期的平均值

约 11 年，而且极大值也不同。为了便于确认黑子活动的变化过程，国际上规定给每个活动周（从极小年起算）以编号，把 1755 年开始的活动周记为第一周，以后顺序编号，现在（2010 年）已处于第 24 周。用黑子面积作相应的统计，依然可得到相同的结果[图 6－23(a)]。

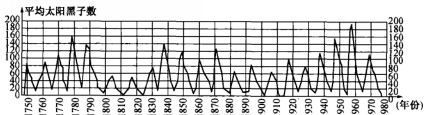
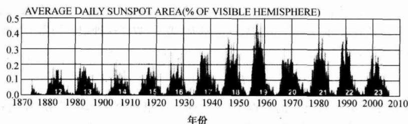
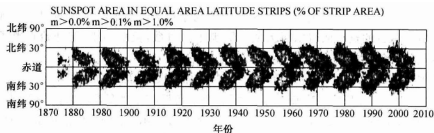


图 6－22 黑子相对数的年均值变化



(a) 黑子面积的年均变化



(b) 黑子的日面纬度分布

图 6－23 黑子活动周期

随着研究的不断深入，人们又发现了太阳黑子活动还有更长的周期，如 22 年的磁周期。此外，还有 80 年的周期和 132 年的周期。

（四）黑子的日面纬度

太阳黑子在日面的分布有明显的规律。其一，黑子很少出现在赤道两旁纬度±8°的区域内和纬度±45°以上的区域。其二，在每个黑子活动周开始时，黑子一般出现在纬度±30°附近，数月后逐渐增多，随后黑子出现处的纬度逐年减小，在黑子极大的年份，黑子大多出现于纬度±15°附近，而后黑子出现处的纬度继续减小，直到纬度±8°处，绝大多数黑子消失，进入极小年。接着，下一个黑子活动周开始，新的黑子又在纬度±30°处出现，如此周而复始。在黑子群出现随时间的变化图上，黑子群的分布形似一队蝴蝶，因而称之为蝴蝶图[图 6-23(b)]。人们把黑子的日面纬度分布和黑子面积的年均变化这两张图放在一起考察，可以明显地看出两者之间的相关性。

（五）黑子的成因

太阳黑子的成因相当复杂，现在已有理论能较好地说明。总的说来与太阳磁场和太阳的较差自转有关。由于太阳物质是带电的等离子体，物质被太阳磁场磁化，因而太阳磁场的磁感线固定在物质上，而不同纬度处的物质因较差自转前进的速度不同，导致磁感线扭曲（见图 6-24）。经过几周自转以后，这种扭曲加剧，一部分磁感线形成的磁环突出光球表面，并导致磁感应强度大幅度增强。强磁场抑制了对流层热能的传递，使热能不能达到表面，从而形成黑子。磁感线从一个黑子表面出来，又进入另一个黑子（见图 6-25）。因此，成对出现的黑子往往具有相反的磁极性。而且，南北半球的磁感线在扭曲的过程中极性的方向正好相反。

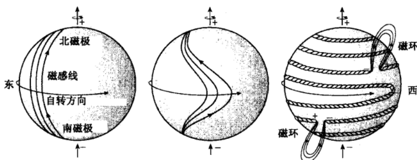


图 6-24 磁感线扭曲

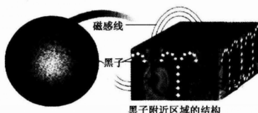


图 6-25 磁环突出形成黑子对

(六) 光斑

用白光观测日面时,在边缘部分(主要在 $0.6R_{\odot}<R<R_{\odot}$ 区域)大块明亮(比光球稍亮)的区域称为光斑。光斑的温度比光球大约高几百 K,亮度仅高 10%左右,因此在明亮的日面中心不易观测到,通常要靠近边缘才易见到。光斑常伴随黑子,它们彼此联系密切。光斑比黑子先出现几小时或几天,具有类似黑子群的偶极特性,寿命比黑子长,也有约 11 年的活动周期。光斑的纬度分布也与黑子类似,但比黑子分布带宽些。此外,还有分布在纬度 70°以上的极区光斑。它们与黑子没有明显关系。

二、谱斑和耀斑

(一) 谱斑

用单色光(例如氢的 Hα 线)观测色球层,其上一些明亮的有结构的区域称为谱斑。实际上,谱斑和光斑乃是同一种太阳活动现象在太阳的两个不同层次中的表现。也就是说,光斑向上延展到色球层便是谱斑,谱斑向下扩展到光球层便是光斑。谱斑展现了环绕黑子的太阳大气中较热的部分,所以谱斑与黑子有密切的关系。谱斑附近几乎都有黑子群,而黑子多时谱斑也必然比较多。谱斑的面积和亮度同样也存在 11 年的周期变化。参看图 6-26,这是一张用 Hα 线拍摄的太阳色球层照片,图右边中间可见两个黑子的影像(注意,黑子本身存在于光球层),每一个都有地球那样的大小,它们周围的亮斑是一些谱斑。谱斑的磁感应强度比黑子弱,而寿命则比黑子长。

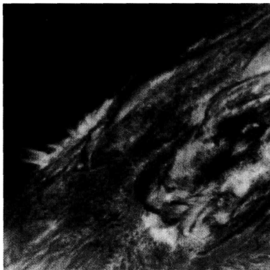


图 6-26 太阳色球照片上的黑子和谱斑

（二）耀斑

在太阳的单色光观测中，色球的局部（黑子邻近的谱斑）区域出现突然且急剧地增亮的斑块，称为耀斑。

耀斑是出现在色球和日冕过渡区中的一种突发过程，是太阳活动中最剧烈的一种现象，也称为色球爆发。耀斑爆发时，在 $10^2 \sim 10^3$ s 的短暂时间内，可释放出 $1\times10^{23} \sim 1\times10^{26}$ J 的能量，也就是说，太阳局部区域的发射功率约可以达到整个太阳辐射的 1%，同时又发出大量粒子（质子、电子、中子）和发生从射电波到 γ 射线的各种电磁辐射。典型的大耀斑事件所释放的能量约为 4×10^{25} J，其中电磁辐射能量（主要在可见光波段）占一小部分（约占 1/4），即约 1×10^{25} J；而粒子动能却占大部分（约占 3/4），即约 3×10^{25} J。图 6-27是用 Hα 线拍摄的太阳像，展示在 10.5 min 的时间内耀斑的爆发过程，每张像的宽度相当于 2.0×10^5 km。耀斑的温度很高，可达 5.0×10^6 K。一般的耀斑必须用单色光观测，但也有极少的耀斑即使在白光中也表现出来，这称为白光耀斑。它们都是特别强大的大耀斑。

耀斑与黑子也有密切的关系。观测表明，绝大多数耀斑出现在偶极黑子群和复杂的多极黑子群附近。耀斑的日面分布与黑子相似，但纬度分布比黑子更广，可以在 ±50°纬度出现，而高纬度的则很罕见。在太阳活动峰年，耀斑活动比较频繁，数目增多，强度

增高，而在黑子极小的谷年，耀斑就明显减少。在不同活动周中，耀斑出现的频率数也有明显的起伏。

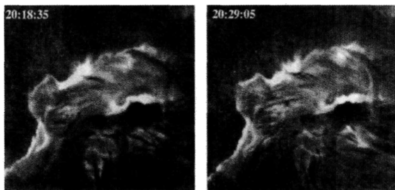


图 6-27　太阳色球层中的耀斑爆发

耀斑通常按它们的面积分为 5 个级别。面积最小的称为亚耀斑，其余按面积增大分为 1～ 4 级。每 1 级又按亮度分为暗弱、正常和明亮 3 个次级。由观测统计可知，级别低的小耀斑出现的数目远远多于级别高的大耀斑的数目。耀斑爆发时，亮度上升的时间在各波段都很短，通常只有几分钟，很少超过 1 h。耀斑的整个寿命也非常短，仅有几分钟到几小时。图 6-28 展示一次典型的耀斑爆发在各波段强度的变化，可见亮度从增强到减弱的整个过程。通常，耀斑的寿命随着级别的增高而增长，小面积的 1 级耀斑的平均寿命约为 25 min，2 级的约为 55 min，而面积较大的 3 级和 4 级耀斑的平均寿命稍长于 2 h。

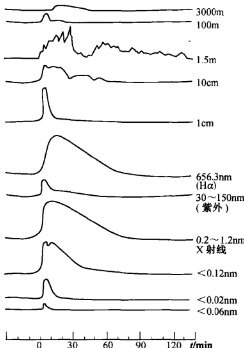


图 6-28　耀斑爆发各波段的强度变化曲线

三、日珥

日珥是出现在太阳边缘的一种变化迅速的活动现象，好似从日面喷发出来的火焰。日珥的形态多种多样，如图 6-29 所展示

的日珥，它们像篱笆、火舌、拱桥和圆环；其他还有的像喷泉、浮云等，不胜枚举。日珥的光度比日面光度小两个量级，因而也只能在日全食的瞬间才能看到。平时研究日珥则需要借助专门的仪器，如色球望远镜等进行单色光观测。日珥其实分布在整个太阳表面，由于它们的光度相对于日面较低，我们看到日面上的日珥呈现为暗条，即日珥在日面上的暗黑的投影(参看图 6－30)。日珥的形状变化很大，大小尺寸也不固定。通常，日珥的长度约为 2×10^5 km，宽度约为 5×10^3 km，高度约为 4×10^4 km。日珥的寿命为几小时到几天。日珥的运动速度为几十至几百千米每秒。由光谱分析可知，日珥的温度为 10^4 K，每立方厘米体积中有电子数约为 10^{11} 个。

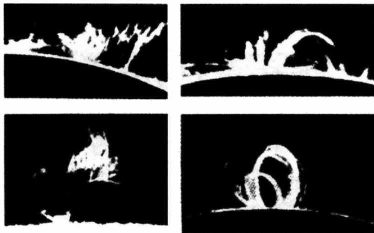


图 6－29　日珥的几种形态

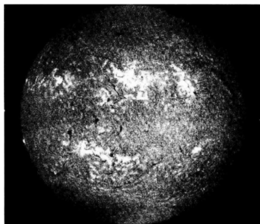


图 6－30　日面上的暗条

依据日珥的形态和运动特征，日珥存在相当多的类型，因而也出现各种不同的分类法。通常把日珥分成两大类型：宁静日珥和和活动日珥。

(一) 宁静日珥

宁静日珥(或暗条)可以出现在日面的宁静区，也可以出现在日面的活动区。它们的变化规模比较小，一般限于局部范围，变化的速度也很慢，需要长时间连续观测才得以发现。图 6－31 展示 Hα 波段上拍摄的日面边缘的宁静日珥，稠密、低温，然而被电离的气体沿太阳磁场的磁感线运动，勾勒出磁场的轮廓，在黑暗的天空背景上显现出来。日冕物质展示成火焰的帷幕，高度在光球之上 6.5×10^4 km。

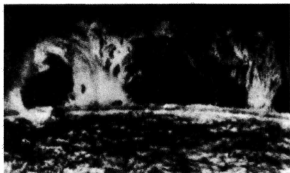


图 6－31 宁静日珥

(二) 活动日珥

活动日珥常出现在活动区内或黑子附近，也常与耀斑伴生。它的变化迅猛激烈，从太阳表面高速升起，但是寿命较短，仅几分钟至几小时。它们的平均温度和磁场都比宁静日珥高得多。活动日珥中最激烈的称为爆发日珥，高度可达数十万千米(见图 6－32)。

其他还有几种类型：

日喷或称喷焰。这种日珥总是在耀斑爆发时从耀斑区抛出，速度达 2×10^2～2.0×10^3 km/s。其特征是因爆发剧烈而物质分为碎片状飞溅出去，大多数不再返回原活动区，与日冕物质抛射有联系。图 6－33 展示一次暗条日喷事件。暗条物质的温度约 2×10^4 K，抛入空中的等离子体形成结点和线条的形状，温度高达 10^6 K，甚至更高。这个喷发结构高达 7.5×10^4 km。

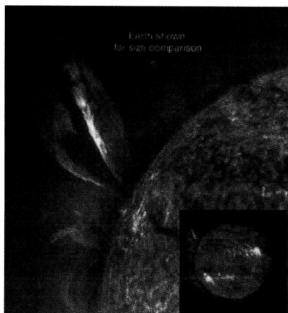


图 6－32　爆发日珥(1999 年 7 月 24 日拍摄的爆发日珥照片，注意它与地球大小的比较，右下角为整个日面)

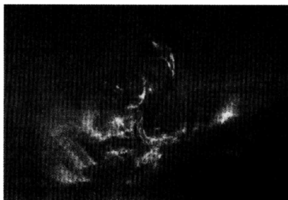


图 6－33　暗条日喷事件

环状日珥。它们以明亮的耀斑为基础发展而来，高温的电离气体随着耀斑强磁场的变化而运动，形成一些不断升高的亮环，物质往下流向两个垂足。在几小时内环系扩展

约达 5×10^4 km 的高度(见图 6-34)。



图 6-34 环状日珥

冕雨。它们来自悬浮在日冕中的云状物(冕云),物质如雨点般落入活动区。它们往往发生在耀斑活动的后期阶段,在 X 射线像上显示有日球上部的冕云。图 6-35 展示太阳的 X 射线像。明亮的区域对应太阳活动区,也是磁场最强的区域,日冕上的电离气体温度可达几百万 K。

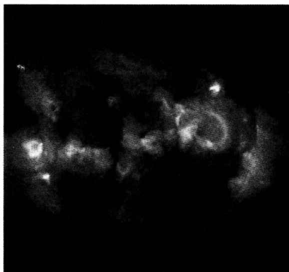
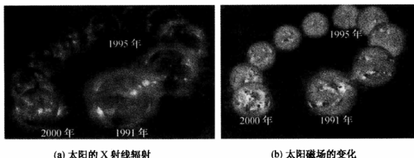


图 6-35 太阳的 X 射线像

日珥可以出现于太阳南、北半球的不同纬度处,但多数集中在较低纬度区。低纬区日珥可以出现在纬度 ±30°～±40° 的范围内,然后逐渐移向赤道。活动周结束时,日珥

出现在纬度±17°上下。高纬度日珥所在的位置不随太阳活动周变化，始终在纬度 ±45°～±50°的区域中。日珥的数目和面积都随活动周变化，与黑子相对数的变化相关。

各种太阳活动现象发生的时候，也伴随着整个太阳辐射和磁场的变化，它们也表现出11 年的变化周期。图 6－36 展示太阳的 X 射线辐射和太阳磁场在第 23 太阳活动周内(1991—2000)的变化。从图明显可见，在这期间的两端(活动峰年)无论 X 射线辐射还是太阳磁场都呈现活动强烈的状态，而在中间(1995 年前后的活动谷年)则显得平静。



(a) 太阳的 X 射线辐射 (b) 太阳磁场的变化

图 6－36 第 23 活动周内太阳磁场和太阳辐射的变化

第四节 日地关系

太阳对地球的无比重要性是毋庸置疑的。当代科学研究的日地关系主要不是指宁静太阳对地球的一般性作用，而着重研究太阳活动对地球的影响。太阳活动变化时，太阳各种辐射和太阳风的改变首先影响日地空间环境，进而影响人类的环境和整个地球。

一、日地空间环境

太阳对地球产生深刻的影响。首先是它的可见光和红外线辐射，它们携带能量到达地球，在不同的波段被海洋、陆地和大气吸收或反射。结果是通过地球自转和公转产生了环流系统，在大气的对流层里造成季节性的天气循环。而地球的气候则是太阳辐射、天气、地表、海洋和人类活动长期相互作用的结果。

这些影响并不是太阳对地球起作用的仅有途径。来自太阳的紫外线和 X 射线与可见光相比，虽然强度小得多，但它们是高能射线，变化也可观得多。紫外辐射被平流层里的臭氧所吸收，而极紫外线和 X 射线在热层(约 90 km 高度)被吸收，导致高层大气电离，产生了电离层。太阳的带电粒子和磁场变化剧烈，其中一个效应就是磁化等离子体形成

的太阳风和与之伴随的日冕物质抛射。日冕物质抛射与地球磁场的相互作用，在地球上造成磁暴（即地磁场的突然而剧烈的变化）。

太阳磁场与它的辐射能输出相耦合决定了太阳高能光子（极紫外线和X射线）的输出，也决定了地球轨道处行星空间的环境（也称空间天气）。太阳活动中的两个主要形式太阳风和日冕物质抛射具有11年的变化周期，它们决定了行星环境的特征。由地球磁场为主导形成的地球磁层处于这一环境下，它的形状受到太阳风的制约（参看第四章第三节和图4-6，4-7）。此外，由来自太阳风和地球电离层的各种粒子形成的地球辐射带，不断地经受着行星际环境带来的改变。电离层是辐射带的内边界，影响着磁层对环境变化的响应，也是磁层内电子和离子的一个源泉。日冕物质抛射影响到地球之后，一方面当地的行星际环境受到扰动，导致磁层的整体性变动，引起磁暴。在环绕地球辐射带内被俘获的高能粒子经历着增多、减损和重新配置，结果是太阳风的能量增强，并转移到近地空间，导致极光发生和高纬电离层的状态变化和热层内物质密度和成分的改变。磁暴和日地环境改变对平流层也可能有影响。另一方面，与磁暴有关的地磁场变化在导电的大地上产生感生电流，这是极端的空间天气的深度影响，已是不争的事实。

对日地关系的研究将促使我们深入了解太阳风、磁层、上层大气和电离层如何高度耦合的物理机制。图6-37展示了构成日地空间环境的各组元及其相互关系。

图6-37 日地空间环境的组元和相互关系

了解日地空间环境也有重要的实际意义。例如，确定宇宙飞船中电子器件对辐射的耐受性、设计航天员的防护服和航天器的防护层、确定地面电网受冲击的极限等方面，都必须了解空间天气的影响。建立科学的预报模型将有助于人们预测磁层的变化，以及随之而来的辐射带和电离层的变动，以便有效地防止对无线电通讯和GPS导航的干扰。我们学习日地关系的知识有助于我们了解天文学和天体物理学的其他领域知识，诸如行星与太阳风的相互作用、太阳系外行星系、恒星活动和宇宙空间的粒子加速等。

二、太阳活动的各种影响

（一）太阳活动的地磁效应和极光

从19世纪中叶以来人们就发现了地球磁场（简称地磁）变化与太阳活动有关。根据全世界多个地磁台的资料分析，这种相关性非常明显（见图6-38）。

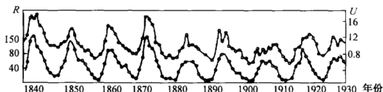


图6-38　1840—1930年太阳活动与地磁活动关系

R—黑子相对数；*U*—地磁干扰指数

偶然短暂的各种地磁变化称为磁扰，而全球同时发生的强烈磁扰就称为磁暴。统计资料表明，磁暴常发生于3～4级大耀斑发生后的一两天内。图6-39是一次大耀斑后的磁暴记录。

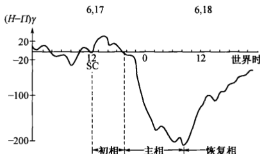


图6-39　北京地磁台1972年6月17—18日的磁场水平分量记录

极光是地磁极区附近高层大气出现的彩色发光现象(彩图 17)。这是由于磁层的带电粒子向大气沉降,沿地球磁场的磁感线到达极区,激发大气的原子和电子而发光。极光出现的频数与太阳黑子数变化有关(见图 6-40)。

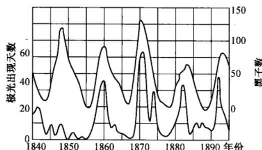


图 6-40 极光出现天数(下侧曲线)与黑子数的相关

(二) 太阳活动的电离层效应

太阳活动的紫外线和 X 射线辐射增强造成电离层扰动。这使得电离层的 E 层和 F 层的电子密度突然增加,而短波无线电靠这两层反射而传播,电子密度突变导致短波反射讯号衰退和路径改变,从而短波通讯中断。例如,在第 23 太阳活动周峰年的 2000 年,北京时间 6 月 2 日 15 时左右,太阳 9026 号活动区有一次强烈的 X 射线爆发。我国大部分地区短波无线电信号受到干扰,持续半小时左右。同年 7 月 14 日发生的太阳耀斑爆发,在 16 日零时(北京时间)影响地球,造成了严重的电离层暴(即电离层的突变)。这次电离层暴持续 20 多个小时,是近来持续时间最长的一次。

(三) 太阳活动对气候变化的影响

太阳辐射的强弱影响天气和气候,这是不言而喻的。人们对很多地方的降水量、气温、气压等气象因素与太阳黑子数的变化做相关统计。结果有的地方是正相关,有的地方是逆相关,有的地方甚至出现相关性的逆转(见图 6-41)。这说明实际关系很复杂。对一定地域来说,这类相关在预报灾害方面是有意义的。例如,研究表明,我国涝、旱、寒、暖的年份有明显的 11 年周期,多数发生在太阳黑子极大极小年附近。

科学家研究了最近 1 000 年里地球平均气温的长期变化与太阳活动的关系。气温变化的历史资料来自对树木年轮、湖海沉积、古代冰和珊瑚礁的分析,太阳活动的资料主要

来自历史上的黑子记录。1 000 年来北半球气温变化的曲线显示近 100 年来气温曲线向上突蹿（见图 6－42）。这一段时间里的细节变化与太阳活动有关，而总趋势则是人类活动造成的恶果。现在，减少温室气体的排放，采取各种有效措施应对气温升高，保护环境，已成为全人类的共识。

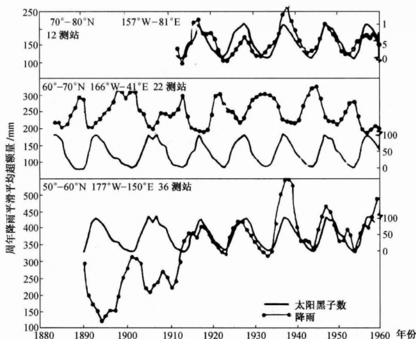


图 6－41　太阳活动与降水量之间的关系

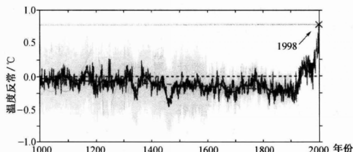


图 6－42　1 000 年来北半球的气温变化（图中间虚线是取 1920 至 1980 年的平均值作为定标线）

(四) 太阳活动对生物和人类的影响

生物和人类的生活和繁衍都依靠阳光的抚育,植物更是把阳光作为光合作用的能源。容易理解,生命活动会受太阳辐射的影响。

在植物生长方面,人们发现树木生长的年轮的疏密明显地呈现出 11 年的周期变化(见图 6 - 43)。图中曲线表明,树木的生长速度与太阳活动的关系十分密切,树木的生长曲线有两个极大,主极大对应于活动峰年,次极大则对应于谷年。还有一个明显的例子是人们统计了 20 世纪 30 至 50 年代全球某些农作物的产量,它们的产量也与太阳活动(黑子数)周期相对应。

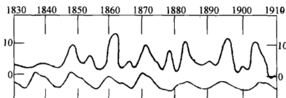


图 6 - 43 树木的生长率(下侧曲线)与太阳黑子数的关系

研究发现,人的神经系统对太阳活动变化很敏感。当活动增强时,神经对信号反应迟钝,出错率明显增加。有人做过统计,交通事故与太阳活动有明显的正相关性(见图 6 - 44)。这种影响既有直接的影响,也有间接的影响。事实上,神经系统对地磁变化特别敏感,磁暴发生时,会导致人的心情烦躁,血压升高,注意力分散,于是事故频发,精神病人增多,心血管病死亡率上升。人的免疫系统的功能也受太阳活动的制约,人们发现流感和其他传染病的发病率也与黑子数相关。

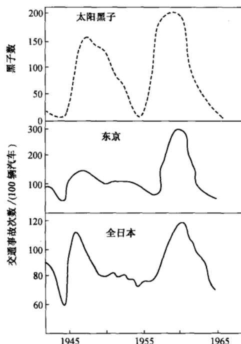


图 6 - 44 东京和日本全国的交通事故率与太阳黑子数的关系

太阳活动的各种因素对地球和人类社会影响的关系如图 6 - 45 所示。从图中可见各因素之间呈现相当复杂的关系。其间各种影响的机理还有待深入探讨。总的来说,太阳的电磁辐射直接影响日地空间环境,它们直接影响大气层,进而影响气候和生物。太阳活动、太阳风和地球磁场通过复杂的磁

层—电离层—大气层耦合过程而影响大气过程和地球环境。太阳活动中黑子是最显著的现象，耀斑是最剧烈的活动。耀斑的电磁辐射到达地球很快，而粒子辐射到达地球较慢。人们观测黑子、耀斑先兆等太阳活动现象，通过理论模型开展空间天气预报，为实用部门服务。日地关系的研究正方兴未艾，它既有实际效益，又有理论意义，具有广阔的发展前景。

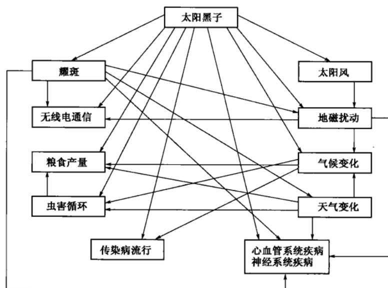


图 6-45 日地关系中各因素综合关系图

第七章　恒　　星

第一节　恒星的一般性质

晴朗无月的夜晚，又远离城市灯光，我们翘首仰望天空，便有点点繁星映入眼帘，其中绝大多数都是被称为“恒星”的天体。按照现代天文学的认识，恒星是质量大多介于0.05～120太阳质量($m_{\odot}$)之间，靠自身的能源发出电磁辐射的天体。

一、恒星的亮度、光度和距离

（一）恒星的亮度

我们在观察恒星的时候，会发现有的恒星明亮，有的恒星暗淡。我们用“亮度”这个术语来描述我们直观上感觉到的明亮程度。实际上指的是在单位面积、单位时间内接收到的来自恒星的能量，即“照度”。早在19世纪中叶，人们已发明了光度计去测量恒星的亮度。即使最亮的恒星，光芒也十分暗淡，如果我们用通常的照度单位去计量它们，数值极其微小，那是很不方便的。天文学上用“视星等”(简称“星等”，用m表示)来计量恒星的亮度。

古代的天文学家用肉眼估计恒星的亮度。早在公元前2世纪，古希腊天文学家伊巴谷(Hipparchus)编制星表时，把恒星分成6个星等。他把肉眼所见最亮的恒星设为1等星，而肉眼勉强能见的最暗恒星设为6等星。天文学家后来发现，1等星的亮度(实为照度)约为6等星的100倍。于是定义星等相差1等，亮度之比为$100^{1/5}=2.512$。事实上，这符合人的生理规律的。在生理学上有一条定律：人的感觉(例如视觉)与外界刺激(例

如照度)的对数成正比。设两颗恒星的星等分别为 m_1 和 m_2,它们的亮度相应为 E_1 和 E_2,那么星等与亮度之间满足下列关系:

$$m_1 - m_2 = 2.5\lg(E_2/E_1) \tag{7-1}$$

其中 lg 表示以 10 为底的常用对数。显然,当 E_2 是 E_1 的 100 倍时,m_1 与 m_2 相差 5 等。请注意,亮度增大,星等减小。

建立了星等与亮度的关系,就可以通过恒星的光度测量,精确地测定恒星的星等,而且能向更亮和更暗的方向扩展。例如,织女星的星等为 0.03^m,天狼星为 -1.44^m,太阳为-26.75^m 等等。(右上角标 m 表示星等的等级)。

(二) 恒星的光度

恒星的发光能力称为光度。光度是天体整个表面在单位时间内辐射的总能量。它是恒星本身固有的、衡量其辐射本领的量,与观测者的感觉无关。光度(用 L 表示)的单位是 W,即功率单位。例如,太阳光度 $L_\odot = 3.845\times10^{26}$ W。有的恒星光度较高,有的较低。恒星的亮度并不真正代表光度。恒星的亮度还与恒星离地球的距离有关,也受星际消光、大气消光等多种次要因素的影响。一颗光度很高的恒星可能因距离较远显得暗淡;反之,一颗光度很低的恒星则可因距离较近显得明亮。我们可以用一排路灯来作说明。假设路灯每个灯泡的功率都是 1 000 W,它相当于恒星的光度。入夜,华灯初上,你站在路边从近处向远方望去。显然,你感到在你头顶的那盏灯最为明亮,越往远去,越显暗淡。事实上,恒星的亮度与它的光度成正比,而与它的距离平方成反比。设一颗恒星的光度为 L,距离为 r,我们感觉到它的亮度(以照度表示)为 E,则有:

$$E \propto \frac{L}{r^2} \tag{7-2}$$

(三) 恒星的距离

天文学家用各种方法测定恒星的距离。其中,测定近距离恒星采用三角视差法。这个方法的原理已叙述于第四章第五节。但是,与那里不同的是测量恒星视差时所用的基线不再是地球直径,而是地球绕日轨道的直径。测量恒星距离的原理,见图 7-1。地球环绕太阳(S 点)旋转,设在某瞬时,地球位于轨道上 E_1 点,半年后,到达 E_2 点。E_1E_2 是地球轨道的直径。以 E_1E_2 为基线,测量恒星(A 点)的视差角$\angle E_1AE_2$,则可算出恒星的距离。测量恒星视差是一项精细而又繁琐的工作。历史上,直到 19 世纪 30 年代后半

期，才有天文学家成功地测定了恒星的视差。

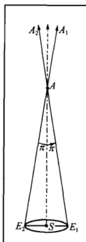


图 7-1　三角视差法测量恒星的视差和恒星视差的定义

在天文学上专门给出了“恒星视差”的定义：在图 7-1 中，在以太阳到恒星的距离 $r = AS$ 为直角边，以地球和太阳的平均距离 $a = SE_1$ 为小边的那个直角三角形中，以恒星为顶点的角 π 称为恒星视差。显然，r 与 π 之间的关系为

$$r = \frac{a}{\sin \pi} \qquad (7-3)$$

由于 π 角很小，可以用它的弧度数代替正弦。通常取 π 以角秒为单位，并记为 π''。又由于 1 弧度=206 265″，并取 a=1 天文单位，则式(7-3)变为

$$r = \frac{206\,265}{\pi''} \text{天文单位} \qquad (7-4)$$

量度恒星距离若用天文单位，这个单位还是太小。通常使用的是下列两种单位：

光年：光线在真空中传播 1 年经过的距离；

秒差距：恒星视差 $\pi'' = 1''$ 时相应的距离。

光年、秒差距与其他长度单位彼此之间的关系如下：

1 光年 = 0.306 595 秒差距=63 239.7 天文单位=$0.946\,053 \times 10^{13}$ km；

1 秒差距= 3.261 63 光年=206 265 天文单位= $3.085\,68 \times 10^{13}$ km。

显然，恒星的距离若以秒差距为单位，与恒星视差之间有下列简单的关系式：

$$r = \frac{1}{\pi''} \text{秒差距} \tag{7-5}$$

所有恒星的距离都极其遥远，恒星的视差都小于 1″。半人马座比邻星是距离最近的恒星，它的周年视差最大，为 0.76″，相应的距离为 1.31 秒差距或 4.27 光年。用三角视差法测量视差，只适用于距离在 100 秒差距以内的恒星。至于更远的恒星，天文学家则采用其他方法。事实上，绝大多数恒星的视差不能用三角视差法求得，但是那些方法的基础是三角视差法，而且测量精度都低于三角视差法。其他方法中很重要的方法是下一小节叙述的光谱分析法。

(四) 绝对星等

为了比较不同恒星的光度，设想把所有恒星都"移到"同一个距离上，然后比较它们的视星等。从式(7-2)可见，在同一距离上，恒星的光度与其亮度成正比。这个距离规定为 10 秒差距(恒星视差为 0.1″的距离)。恒星在这个"标准距离"上的视星等称为绝对星等，以大写字母 M 表示。注意：绝对星等虽然也称为"星等"，它与视星等代表恒星亮度在本质上已经不同，它代表的是恒星的光度。由于它的数字简单，天文学上在应用光度的场合，往往用绝对星等表示。例如，太阳的绝对星等 $M_\odot = 4.75^m$。

设 E 表示观测到的恒星的亮度，E_1 表示假想把这颗恒星"移到"10 秒差距标准距离上的亮度，这颗恒星的距离为 r(也以秒差距为单位)，则据式(7-2)有

$$\frac{E_1}{E} = \frac{r^2}{10^2}$$

把此式代入式(7-1)，便得到

$$M = m + 5 - 5\lg r \tag{7-6}$$

利用式(7-5)把 r 换成 π''，便得

$$M = m + 5 + 5\lg \pi'' \tag{7-7}$$

这两式是天文学上常用的公式。视星等 m 可以直接由观测得到。如果测定了恒星视差，则可求得恒星光度；反之，若以某种方法求得了恒星的绝对星等，则可算出它的距离。量 $m-M$ 称为距离模数。它表明距离使星光暗淡的程度(用星等表示)。

二、恒星的光谱

(一) 光谱的性质

各种恒星的光谱都显示为一定的连续光谱并叠加有吸收线。简单地说,恒星大气的底层温度高而稠密,产生连续光谱;上层温度较低而稀薄,其中的原子和分子在特定的波长上吸收了底层的辐射,产生了吸收线。实际上,恒星大气中的每一团气体都在发射和吸收光子,过程是很复杂的,但是总的效果是吸收强。恒星的光谱堪称为恒星的 DNA,它蕴含着恒星各种特性的丰富信息。分析恒星光谱可以直接或间接地确定恒星大气的化学成分、表面温度、压力、光度、直径、质量、磁场,也能借以研究恒星的自转和视向速度,以及测定恒星的分光视差。

(二) 恒星光谱分类

19 世纪末至 20 世纪初,美国哈佛大学天文台拍摄了成千上万颗恒星的光谱,对它们进行分类。按恒星表面温度从高到低的次序分成下列类型:O,B,A,F,G,K 和 M,见表 7-1。不同光谱型对应恒星不同的颜色。每一类型又分为 10 个次型,用数字 0,1,2,…,9 表示。例如,太阳的光谱型是 G2。彩图 18 给出一些不同类型的恒星光谱。这些光谱显示,恒星的温度由高到低,光谱线越来越多。

表 7-1 恒星光谱分类

光谱型	颜色	表面温度/K	典型星
O	蓝	40 000～30 000	参宿一(猎户 δ)、参宿三(猎户 ζ)
B	蓝白	30 000～10 000	参宿五(猎户 γ)、参宿七(猎户 β)
A	白	10 000～7 500	织女星(天琴 α)
F	黄白	7 500～6 000	南河三(小犬 α)
G	黄	6 000～5 000	太阳,五车二(御夫 α)
K	橙	5 000～3 500	大角星(牧夫 α)
M	红	3 500～2 500	心宿二(天蝎 α),参宿四(猎户 α)

（三）分光视差

对恒星光谱进行仔细研究后发现，在光谱类型相同的恒星光谱中，总可以找到几条谱线，他们的强度只随光度而改变。一些近距离的恒星，已经用三角视差法精确地测定了它们的恒星视差，也测定了这些谱线的强度，就可以把它们作为样本，用来定出谱线强度与恒星视差之间的关系。以后，对于同一光谱型的恒星，只要测定了相应谱线的强度，就可以用以上求得的关系，定出他们的恒星视差。这种建立在光谱分析基础上的测定恒星视差的方法，称为分光法，由此所得的视差称为分光视差。应用分光视差法可以测定不能用三角视差法测量恒星视差的遥远恒星，但是对于暗弱的恒星，由于得不到清晰的光谱，分光法仍不适用。

（四）赫罗图

1911 年，丹麦天文学家赫茨普龙（E. Hertzsprung），1913 年美国天文学家罗素（H. N. Russell）各自独立地绘出了恒星的光谱-光度图。后来经过发展，现在的光谱-光度图如图 7-2 所示。图中的横坐标为光谱型，从左向右按 O，B，A，F，G，K，M 的顺序排列，也是恒星表面温度由高到低的序列。纵坐标是绝对星等，用来标志恒星的光度，从下到上数字逐渐减小，意味着恒星光度增大。每颗恒星的光谱型和绝对星等测定后，就在图上按相应的纵坐标和横坐标标出一个点。这种图对于研究恒星的结构和演化十分重要。人们把恒星的光谱-光度图称为赫茨普龙-罗素图，简称赫罗图或 H-R 图。

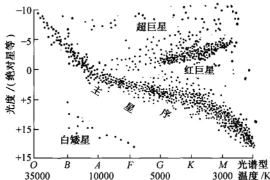


图 7-2 赫罗图

从图 7－2 可见，代表恒星的点不是均匀分布的，而是集中在几个区域。其中绝大多数恒星落在从左上至右下的带上。这条带称为主星序或主序。位于主序上的恒星称为主序星。对于主序星，表面温度越高，光度就越大。有些恒星位于主序的右上方，它们的光度比相同光谱型的主序星大，称为巨星。光度比巨星更大的恒星称为超巨星。有些恒星位于主序的左下方，它们的温度高，但是光度小，称为白矮星。它们的光度比相同光谱型的主序星小得多。

主序是恒星在其一生的演化历程中驻留时间最长的阶段，大约占恒星寿命的 80%左右。在这一阶段，恒星核心内进行着氢燃烧（这是一种形象的说法，实指 4 个氢原子核聚变为一个氦原子核的聚变反应，而非化学燃烧）。处于主序阶段的恒星称为主序星，太阳就是一颗主序星。当主序星核心内的氢燃烧殆尽而只剩下氦炉渣时，主序阶段便告结束，恒星开始新的演化历程。在主序阶段，恒星是稳定的，它处于两种平衡状态：一是恒星核反应产生的向外辐射压力与向内的自身引力平衡；二是每个瞬间核反应产生的能量与从恒星表面向外辐射的能量平衡。恒星在主序上的时间取决于它的质量。1 $m_{\odot}$ 的恒星在主序上停留约 100 亿年。质量越大，时间越短。例如，对于 15 $m_{\odot}$ 的恒星，短到只有 2×10^{7} 年，这是因为质量大的恒星虽然拥有较多氢燃料，但是它们的光度大，氢燃料的消耗比小质量恒星快得多。好比穷人省吃俭用，节约开支，能长期维持平稳的生活，而富人经不起肆意显摆，无度挥霍，不久便难以为继，家境衰落。（见表 7－2）

表 7－2　全天 21 颗亮于 1 等的亮星星表

序号	星名	中名	视星等	绝对星等	距离/(光年)	光谱型
1	大犬 α	天狼	−1.46	1.42	8.7	A1
2	船底 α	老人	−0.72	−2.4	71	F0
3	半人马 α	南门二	−0.27	4.4	4.4	G2
4	牧夫 α	大角	−0.04	−0.3	35	K2
5	天琴 α	织女一、织女	0.03	0.5	26	A0
6	御夫 α	五车二	0.08	0.1	44	G8
7	猎户 β	参宿七	0.12	−7.1	910	B8
8	小犬 α	南河三	0.38	2.6	11	F5
9	波江 α	水委一	0.46	−1.6	84	B3
10	猎户 α	参宿四	0.50	−5.6	540	M1
11	半人马 β	马腹一	0.61	−5.1	450	B1

（续表）

序号	星名	中名	视星等	绝对星等	距离/(光年)	光谱型
12	天鹰 α	河鼓二、牛郎、牵牛	0.77	2.2	17	A7
13	南十字 α	十字架二	0.79	−3.8	410	B1
14	金牛 α	毕宿五	0.85	−0.6	65	K5
15	天蝎 α	心宿二、大火	0.96	−4.7	440	M1
16	室女 α	角宿一	0.98	−3.5	260	B1
17	双子 β	北河三	1.14	1.0	35	K0
18	南鱼 α	北落师门	1.16	2.0	22	A3
19	南十字 β	十字架三	1.25	−5.0	580	B1
20	天鹅 α	天津四	1.25	−7.5	1800	A2
21	狮子 α	轩辕十四	1.35	−0.6	72	B7

三、恒星的大小、质量和密度

（一）恒星的大小

要测量恒星的大小必须测定恒星的角直径和它的距离。恒星的角直径非常小。在望远镜的视场里，恒星显示为一个光点，却显示不出可测量的圆面。因此，测定恒星的角直径是一个困难的课题。现在只对几百颗亮度较大的恒星成功地直接测定了角直径。此外，若已知恒星的光度和表面温度，可以通过间接方法求出其半径，大量恒星的大小资料是由此而求得的。

从已经求得的结果来看，恒星的大小相差很多。一方面，大恒星的直径可达太阳直径的几百倍至一两千倍，它们被称为巨星和超巨星，例如猎户 α(参宿四)是一颗超巨星，它的直径为太阳的 900 倍；仙王 VV 双星系统中较亮的那颗星也是一颗亮星，它的直径是太阳的 1 600 倍，比木星的轨道直径还大。另一方面，有的恒星直径小，它们被称为矮星，其实太阳就是一颗矮星。有许多恒星比太阳更小，只及太阳几分之一或几十分之一。下文要讲的白矮星的直径就只有太阳的 1%，而中子星的直径只有 10 km。

（二）恒星的质量

质量是恒星最重要的一个物理量。它决定了恒星的物理状态和演化过程。但是，除了太阳的质量已经精确测定以外，其他恒星的质量都很难测定。大多数单颗恒星无法直接测定其质量。双星系统中的成员和已确定其周围有行星的恒星，在一定条件下才能从轨道运动直接测定出它们的质量。双星中的主星和伴星均环绕它们的质量中心作椭圆轨道运动，通过测量它们的运动周期和轨道半长径，应用开普勒行星运动第三定律可求出它们的质量。对于有行星环绕的恒星，要测定其质量，原理与双星的情形相同。还有一些间接的方法测定恒星的质量。从理论上判断，恒星的质量不能太小，若太小了，星体内部温度就达不到点燃热核反应所需的最低值，星体不发光，不能成为恒星，理论上不能低于 0.05 $m_\odot$；恒星的质量也不能太大，若太大了，星体很不稳定，活动非常剧烈，导致激烈的爆发和大量抛射物质，理论上不能超过 120 $m_\odot$。从已经被测定质量的恒星来看，大多数恒星的质量为 0.07～60 $m_\odot$。恒星在光度和直径方面的差别很大，但是质量的差别要小得多。

对于主序星来说，根据恒星结构理论可以导出恒星的质量与光度之间的关系：恒星质量越大，光度越强。这称为质量-光度关系，简称质光关系。对很多主序星测量的实际结果，也证实了这一关系（见图 7－3）。因此，根据这个关系可以定出单个恒星的质量。不过要强调只适用于主序星，而且所得结果也只是近似值。

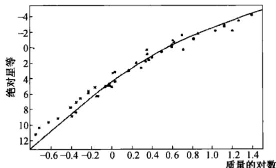


图 7－3 主序星的质光关系（平滑曲线为理论值，各种符号表示不同类型恒星的实测值）

主序星的质光关系意味着较热的恒星质量较大，较冷的恒星质量较小。恒星的质量 m（以太阳质量为单位）与光谱型大致上的关系如表 7－3 所列。

表 7-3 主序星的质量与光谱型

光谱型	$m/m_{\odot}$
O5	40.0
B5	7.1
A5	2.2
F5	1.4
G5	0.9
K5	0.7
M5	0.2

(三) 恒星的密度

知道了恒星的大小和质量,就可计算出恒星的平均密度。恒星的平均密度差别很大。例如,太阳的平均密度为 1.4×10^{3} kg/m³,在恒星中处于中等地位。天空最亮的恒星天狼星是一个双星系统,其中的暗伴星是一颗白矮星。它的质量比太阳略大,但体积只及地球的3/4,它平均密度达 2.5×10^{9} kg/m³。中子星的平均密度更高,一颗半径为15 km的中子星的平均密度为 2×10^{17} kg/m³。在另一极端,巨星和超巨星的密度则非常低。例如,红超巨星参宿四的平均密度为 10^{-4} kg/m³,只及地球表面空气密度的 10^{-4}。

四、恒星的运动

(一) 恒星的空间运动

恒星在宇宙空间是运动的。只是由于距离遥远,即使经历成千上万年,它们的位移与距离相比,小到可以忽略,不借助特殊的工具和方法难以发现它们的运动,故古人称之为恒星。1718年,英国天文学家哈雷发现恒星位置在天球上的变化,这种变化称为自行,用恒星每年在天球上移动的角度来表示,单位为角秒每年。图7-4显示北斗七星由于各颗恒星的自行在10万年前后的形状变化。

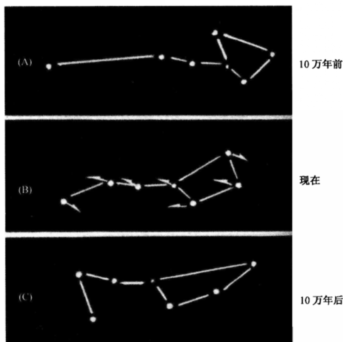


图7-4 北斗七星的形状变化

自行的发现使人们认识到恒星不“恒”。进一步的观测和分析揭示了恒星的空间运动。恒星的空间运动速度分成两个分量：一个在视线方向，称为视向速度，以 v_r 表示；另一个与视线方向垂直，称为切向速度，以 v_t 表示(见图7-5)。它们的关系为

$$v = \sqrt{v_r^2 + v_t^2} \tag{7-8}$$



图7-5 恒星的空间运动速度

(二) 视向速度与多普勒效应

恒星视向速度可根据物理学中的多普勒效应，通过对恒星的光谱分析求得。当观测

者与波源之间有相对运动时,观测者测得的波频率与波源发出的波频率不同的现象,在物理学上称为多普勒效应。这一普遍的物理现象是奥地利物理学家多普勒(J. C. Doppler)在1842年首先发现的。如果波源是声源,例如火车的汽笛,当火车向我们开来时,其汽笛声调变高昂(即声波频率变高,波长变短),而远离时声调变低沉(即声波频率变低,波长变长),如图7-6所示。如果波源是光源,例如天空的恒星,当恒星向我们接近时,光谱向紫端移动(简称"紫移",即光波频率变高,波长变短),这时取视向速度为负值,而远离时光谱向红端移动("红移",即光波频率变低,波长变长),这时取视向速度为正值。谱线波长的位移量 $\Delta\lambda$(紫移或红移)或谱线频率的位移量 $\Delta\nu$,与光源相对于观测者的运动速度 v_r 以及原波长 λ_0 或原频率 ν_0 相应地成正比,即

$$\Delta\lambda=\frac{v_r}{c}\lambda_0 \text{ 或 } \Delta\nu=\frac{v_r}{c}\nu_0 \tag{7-9}$$

其中 $\Delta\lambda=\lambda-\lambda_0$,$\Delta\nu=\nu-\nu_0$,$\lambda$ 和 ν 为位移后的波长和频率,c 为光速。

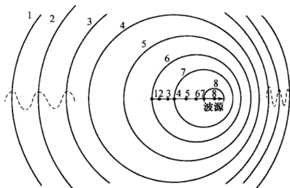


图7-6　多普勒效应

远距离的河外星系,包括类星体,随宇宙膨胀以很大的速度远离我们,也能在它们的光谱中测量出很显著的红移量。

对于近距离的恒星来说,视向速度的数值通常为几十千米每秒。

(三) 切向速度与自行

恒星自行是其空间运动的切向速度在天球上的投影。因此,切向速度可由测量恒星的自行和距离求得。天文学家求恒星自行的方法如下:把同一颗恒星的相隔若干年的位置(即天球坐标)转化到同一个天球坐标系内,求得两个位置之差(以天球上的弧段表示

并以角秒为单位)。这个弧段除以两个位置相隔的时间(以年为单位),便得到这颗恒星的自行。而恒星的距离则可由其视差获得。如果把以角秒每年为单位的自行值化为以 rad/s 为单位(注意:这将是一个非常微小的数值),而把恒星的距离化作以 km 为单位(注意:这将是一个真正的天文数字),把这两个数字相乘,就得到以 km/s 表示的切向速度。

对于近距离的恒星来说,切向速度的数值一般为几十千米每秒。

(四) 太阳的本动

如果我们修正了地球自转和公转对恒星空间运动观测的影响,则相当于在太阳上测量恒星的运动。这种空间运动相当于恒星与太阳的相对运动。其中,包含太阳和恒星各自绕银河系中心的旋转以及它们各自相对于银河系的运动;前一种运动是由银河系自转引起的,后一种运动称为本动。由观测资料的分析揭示太阳在空间以 19.7 km/s 的速度向武仙 μ 的方向作本动。

五、恒星的能源和能量传输

(一) 核反应

处于主序星阶段的恒星依赖其内部产生的辐射压和向外辐射的热量维持着星体的平衡。在上一章叙述太阳的能量来源时,我们已经知道,在恒星一生的大部分时间中,它所产生的辐射压和热量是由核反应提供的。

恒星内部最重要的核反应是由氢核结合形成氦核的热聚变反应,这时氦核内有一份"结合能"把 4 个氢核结合起来。在第六章第一节,我们已阐述了有两种重要的反应能完成氢氦聚变。反应完成后,4 个氢的质量大于 1 个氦核的质量。反应前后的质量差称为质量亏损 Δm。正是这份质量,按爱因斯坦的质能关系式 $\Delta E = \Delta mc^2$ 转化成了能量释放出来。而且,原子核的结合能在数值上等于质量亏损对应的能量。当 4 个氢核聚变成一个氦核时,$\Delta m = 0.0287$ u(原子质量单位),它等于 4 个氢核质量的 0.72%。核反应都很敏感地依赖于反应物质的温度。中心温度较低的恒星,质子-质子反应是主要的产能机制,太阳内部的核反应就属于这种情况。当恒星的中心温度高于 1.6×10^7 K 时,碳氮循环占优势。当温度低于 7×10^6 K 时,这两种反应都不能进行。

当恒星在脱离了主序阶段以后,其他的核反应也可以发生。例如,温度接近 2×10^8 K 时,3 个氦核可聚变成一个碳核,并释放出能量。碳核又能在一定条件下(主要取决于恒星的质量和由其决定的恒星中心温度)通过更复杂的反应聚变成氧、钠、镁、硅、硫等元素

的原子核，直至形成铁核。在形成铁核以后，恒星内部不再能继续进行核聚变反应。那是因为原子核的质量数小于铁元素的质量，在由较轻的元素合成时，总体上原子核的结合能在增加，因而释放出能量。这是原子核的聚变过程。相反，原子核的质量数大于铁元素的质量数，只有当由较重元素的原子核转变成几个较轻的原子核时，才会产生质量亏损，释放能量。这是原子核的裂变过程。例如，铀的裂变反应，原子弹爆炸或当前的原子能发电都是利用这种反应产生能量的。自铁之后，由较轻元素聚变成较重元素的过程不是放热过程，而是吸热过程。恒星内部碳之后的核反应对恒星能量的贡献是很微薄的，它们的主要作用是在恒星内部合成了到铁为止的各种化学元素。至于自然界比铁更重的元素则来源于超新星的爆发。

恒星内部的核反应常形象地称为“燃烧”，如氢聚变成氦的反应称为氢燃烧，氦聚变成碳的反应称为氦燃烧，等等。当然，这不是通常所称的燃烧，那只是一种化学反应。一种核反应的开始常称为“点火”，而“燃烧”的产物又往往称为“炉渣”。

（二）能量传输

恒星内部由于核反应而产生大量能量，其中心的温度极高，而其外部的温度相对于中心则低得多。热能总是由温度高的地方向低的地方传输，在恒星内，温度形成了由中心向外自高到低的梯级分布，压力和密度的分布状态也是这样。热能的传输有三种方式，即传导、对流和辐射。

传导是电子输送能量的过程，而辐射是光子输送能量的过程。在正常恒星中，一个电子携带的能量虽然可能超过一个光子携带的能量，但是电子能自由穿行的距离远远地小于光子。这意味着与电子相比，光子更容易将能量从恒星内较热的区域向外传输。因此，在正常恒星内，辐射是重要的能量传输方式，而传导则很不重要。

对流在一个由流体构成的区域两端温度差异很大的情况下发生，这是一种很有效的能量传输方式。如果在某一区域对流一旦发生，那么它就成为其中能量传输的主要方式。物质的对流运动还促使该区域内的物质混合，使对流区域内的各层具有相同的化学成分。大质量恒星的中央区域和较小质量恒星（例如太阳）的外层是物质的对流区域。

在恒星内部，在光子的传播过程中，原子会对光子产生吸收作用，而后通过跃迁重新发射光子；自由电子则对光子产生散射作用。这些作用都使光子偏离了原来的传播方向，从而造成了恒星内部物质的不透明。携带能量的光子在向外传播的过程中，平均每移动 1 cm 就会遭受原子或自由电子的阻挡，便随机地改变传播方向。计算表明，它们要经历几十亿或几百亿倍于恒星半径的路程，才能将能量从恒星中央传输到表面，这需要经历几百万到几千万年的时间（见图 7－7）。

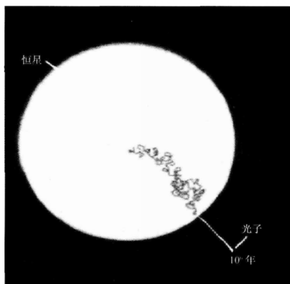


图 7-7 光子在恒星内部的传播路程

第二节 恒星的形成和演化

18 世纪中叶和末年德国哲学家 E. 康德和法国数学家兼力学家 P. - S. 拉普拉斯分别独立地提出了关于太阳系起源于星云的学说，成为科学的天体起源和演化学说之滥觞。现代天文学确实认为恒星起源于星云之内。

一、恒星形成

（一）巨分子云

当代天文学家认识到大多数恒星是通过巨分子云形成的。由射电天文的观测，发现在银河系里存在大量巨分子云，它们的主要成分是氢分子，并含有质量约 1% 的尘埃，散布着磁场；它们的直径约 50～300 光年，质量达 $10^5 \sim 2\times10^6\ m_{\odot}$，属于银河系内最大的天体。它们的温度一般不超过 10 K，平均每立方厘米气体中有 $1\times10^2 \sim 3\times10^2$ 个分子。在它们内部，散布着纤维状、团块状和稠密核的结构。稠密核每立方厘米体积中有 10^4 个分子，直径从十分之几光年至十几光年，相应的质量从 $1 \sim 10\ m_{\odot}$ 至 $10^2 \sim 10^4\ m_{\odot}$。

观测发现，年轻恒星通常存在于分子云或其附近，极大量的年轻恒星在巨分子云里诞生，它们是恒星的产房。例如，猎户星云里的恒星形成区，距离太阳约 1 500 光年，构成了一个年轻天体和弥漫物质的庞大复合体（彩图 19）。这个复合体在最近 1 000 万年里产生了成千上万颗恒星。

（二）恒星形成的过程

恒星在尘埃分子云的稠密核里形成。刚诞生的恒星深深地着床于它们的母星云中，气体和尘埃稠密地包围在新生恒星四周，以致任何可见光完全被吸收。然而，红外光和射电波则能穿透星际尘埃和气体。红外和射电技术的进展为人们了解恒星的形成作出了革命性贡献。

星云内的稠密核是引力吸引中心，吸引着大量周围的物质向它下落，核心物质增多，引力增强，因而收缩。核心温度上升，提升气体压力，压力与引力平衡。这个核心与它周围一大片星云物质使巨分子云分裂。每一个核心产生时的质量很小，只有约 1%太阳质量，但直径大到几个天文单位，大致与火星轨道半径相当。它们是形成恒星的种子，称之为恒星胎。

恒星胎继续吸引着周围物质，它的质量快速增大，温度持续上升。当其内部温度上升到 2×10^3 K 时氢分子离解了，平衡核变得不稳定，从而收缩，收缩到大小类似于太阳，再度达到平衡状态。这个核心称为原恒星，标志着恒星已进入幼年期，并逐渐迈向少年和青年期。星云物质成为包围它的壳层。在原恒星的强大引力下，物质继续暴雨般地下落，在它的周围形成一个星周盘。壳层内物质先落入星周盘，经过星周盘逐渐落到中央的新生恒星上面。这是年轻恒星生长的第一阶段。这时只有亚毫米波观测才能探测到萌芽期恒星的存在。处于这一阶段的天体称为 0 级源。0 级阶段估计持续 1 万～2 万年。图 7－8 展示新生恒星及其盘的形成和演化。



图 7－8 星云核的收缩、原恒星及其盘的形成和清除，并形成行星（自左至右）

原恒星形成后通过吸积物质，积累质量达到终态质量的一半以上，温度上升到 30～40 K，这时能在红外波段探测到，称为Ⅰ级源。Ⅰ级阶段延续得较久，可能是几十万年。

原恒星通过收缩，不断地释放引力能，获得它的大部分能量。这是它与一般恒星不同之处，后者则是通过热核聚变获得了能量。一颗年轻恒星不可能永远收缩下去，但是它通过收缩维持能量需求的时间长度对于保持恒星的青年期已绰绰有余。

有些Ⅰ级源已经充分耗尽了周围的壳层，新生恒星从其母体物质内脱胎而出，它们已能在光学波段可见。这一阶段的恒星以金牛星云内的变星金牛 T 为代表，称为金牛 T 型星，或称为Ⅱ级源，由于它们有大的星周盘环绕，它们在红外波段也很亮（见图 7－9）。



图 7－9　金牛星云中稠密的星周盘环绕着年轻的红外源

光学、红外和射电观测已揭示了许多年轻恒星，包括许多金牛 T 型星有偶极喷流或单向喷流。喷流的形成与星周盘和磁场有关。恒星喷出的气体沿盘的方向受到盘的磁场很大阻碍，结果集中到垂直于盘的方向高速喷出。图 7－10 左边是一张光学照片，右边是相应的图示，展示从一颗原恒星发射出一束气体喷流，起初是明亮的，经过约 0.2 光年的路程后，因冷却而变得不可见。再经过约 0.5 光年的路程，这股强劲的高速气流与星际物质相互作用形成一个称为 HH 34 的天体。

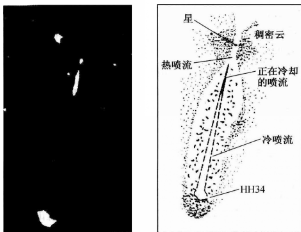


图 7-10 原恒星的喷流

随着年轻恒星的演化，其周围的气壳终于消失，星周盘不再能获得补给，盘内的物质也逐渐结合成为团块，成为日后构筑行星的材料。这时的恒星已失去了起因于盘的特征，即没有了过量的红外辐射，这类恒星称为Ⅲ级源。Ⅱ级源和Ⅲ级源是很活跃的天体，除了强烈的喷流以外，有时会出现短暂的爆发，这时恒星的亮度迅速增长几倍，随后在几小时内慢慢回落。它们也是X射线的强辐射源，X射线辐射比太阳高过千倍以上。

在Ⅲ级阶段，年轻恒星从它们青少年的狂躁中平静下来。它们继续慢慢地收缩，并终于在1千万至1亿年(取决于质量)之后，把其内部温度和压力提升得相当高，足以点燃稳定的氢燃烧。这时，恒星成为一颗主序星，开始了它们一生中最漫长的成年生活。对于诸如太阳这样的低质量恒星来说，成年期(即在主序上)能延续约100亿年。

二、恒星演化

进入主序的“成年”恒星的质量各不相同，质量较大的处于赫罗图上主序的左上方，较小的则处于右下方。它们的质量决定了它们日后的演化历程和寿命。对于大多数恒星，在它们一生中的大部分时间内，即在主序上的质量损失是微不足道的。因此，主序星不会沿着主序，而应离开主序演化。

(一) 小质量恒星的演化

首先考察质量低于约8 $m_{\odot}$ 的恒星。随着核心内氢燃料耗尽，核心外围星体内一个

壳层的氢开始燃烧，加热恒星的外层使之膨胀；而核心由于燃烧熄灭失去辐射压力而开始收缩。随着核心收缩，恒星的中心温度升高，达到 10^8 K，点燃了氦聚变反应：3 个氦原子核燃烧成为一个碳原子核，这个反应经历的时间十分短促。核心释放的能量迫使星体继续膨胀，恒星的温度降低，但光度增大，成为一颗红巨星。例如，太阳在这时表面温度降到约 3×10^3 K，半径可能超过地球轨道半径。当核心内的氦耗尽后，核心坍缩成为一颗白矮星，而恒星的外壳逐渐扩散成为行星状星云。

（二）大质量恒星的演化

大质量恒星（质量大于 8 $m_{\odot}$）的主序寿命也终结于核心的氢耗尽之际，这与小质量恒星相同。于是核心开始收缩，迅速达到了由氦聚变为碳所需的温度，外面包裹着氢燃烧的壳层。与小质量恒星不同的是，氦燃烧能稳定地进行。当核心中的氦耗尽后，温度高得足以使碳聚变成更重的元素。这时有了碳燃烧核心，包着一个氦燃烧的壳层，而后者又包着一个氢燃烧壳层。随着更重元素的产生，核心内形成了更多的重元素燃烧的壳层（见图 7－11）。

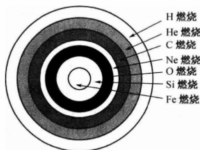


图 7－11 大质量恒星在演化到脱离主序后所具有的壳层状核心（在核心内，叠合着不同成分的多个壳层，每一层在燃料耗尽后，它外边的各层还在燃烧）

随着核心光度的增加，恒星的外层膨胀。大气随着膨胀而冷却，但是体积增加得相当多，使得光度提高。最后恒星半径达到约 10^3 $R_{\odot}$，成为一颗红超巨星。

当恒星的核心中心最终形成一个铁核时，那里的聚变反应便终止了。在这一阶段，核心开始冷却，热压力不足以平衡引力，铁核在 1 s 的时间内迅速坍缩，形成中子星，甚或黑洞。核心的坍缩导致星体爆炸，成为超新星爆发，大部分质量向外抛射，形成弥漫的超新星遗迹。白矮星、中子星或黑洞等致密星通常是恒星的最终归宿。

第三节 双　星

一、双星及其分类

由两颗恒星构成的系统称为双星。这两颗恒星在相互引力作用下，环绕公共质心各自在椭圆轨道上运动，又称为物理双星。如果两颗星正好位于视线上大致相同的方向，看起来似乎靠在一起，但实际上两星之间可能相距非常遥远，这样的双星称为光学双星，而不是真正意义上的双星。本文所述双星主要是物理双星。构成双星的两颗恒星均称为双星的子星，其中亮度高、质量大的子星是主星，较暗的小质量的子星是次星或伴星。

两颗以上彼此之间有物理联系的恒星系统分别称为三合星、四合星等，或总称为聚星。双星在恒星世界十分普遍，银河系内超过半数的恒星处在双星或聚星系统中。

最常见的双星进行分类是依据观测方法，把双星分成目视双星、分光双星和食双星三大类。

（一）目视双星

通过望远镜能直接分辨出两颗子星的双星称为目视双星。这两颗子星分离的角距离较大，原因可能是它们离地球较近，也可能是虽离地球较远，且彼此相距也很远。在后一种情况下，它们的绕转周期会很长，长的达几百年以上。这类双星绝大部分的周期超过几年。

有些双星的一颗子星明亮，但另一颗子星太暗淡，看不见。但精确测量亮子星的自行，发现其路径呈波浪形。这颗恒星在做轨道运动，所以能够推断存在一颗伴星。这类双星仍归于目视双星。天狼星是一个著名的例子。在未发现它的伴星之前，已经断定它是双星了（见图 7－12）。当前已发现的目视双星将近有 8 万对。

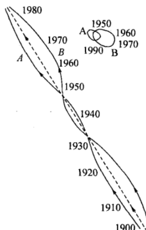


图 7－12　20 世纪天狼星 A 和 B 在天球上的运行轨迹（虚线是这个双星系统质心的轨迹，右上图表示天狼星 A 和 B 相对它们质心的轨道）

（二）分光双星

许多双星的两颗子星靠得很近，不能用望远镜分辨开来。但是它们的光谱却显示由两颗恒星产生的，这类双星称为分光双星。这时我们看到谱线的波长相对于平均波长做周期性的振荡。这是由于两颗子星相互绕转，它们相对于我们的运动使谱线产生多普勒位移。当恒星在其轨道上向我们靠近时，我们看到谱线的波长在缩短，而当恒星在其轨道上向我们远离时，我们看到谱线的波长在增长，现已发现的分光双星约有 5 000 对。

（三）食双星

如果我们的视线几乎与双星的轨道面平行，则能观测到两颗子星互相掩食的现象，双星的亮度呈周期性变化。食双星的光变周期就反映了它们的轨道周期。图 7－13 的上图展示双星系统。较暗的次星交替地通过主星的前面和后面。大部分时间，如在 C 的位置，我们看能到来自两颗恒星的光线，这时看到的恒星最亮。当次星掩食主星时，主星的部分光线被阻挡，光线强度发生跌落，如在 A 点。当次星通过主星后面时，如在 B 点，它的光失去了。由于次星不如主星那么亮，亮度的跌落不如在 A 点那么大。下图为光变曲线。通常在一个周期中，当次星掩食主星时，光变曲线出现主极小，如图中之 A 点，当主星掩食次星时出现次极小，如图中之 B 点（上下图中的 A,B,C 点是一一对应的）。食双星就是食变星，属外因变星，已发现了 4 000 多对。

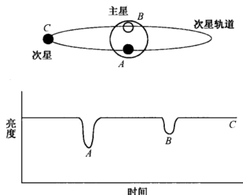


图 7－13　食双星

著名的食变星有英仙 β（中名大陵五）和天琴 β（中名渐台二），前者的光变曲线和两子星的相应位置示于图 7－14，后者的光变曲线和两子星的相应位置示于图 7－15。天琴 β 的光变曲线不像英仙 β 的光变曲线那么平直，而是弯曲的。这表明两颗子星相距较近，它们在彼此潮汐力的作用下都畸变成扁球形或蛋形。这样，两颗子星扁球形的影响使得在极小（包括主极小和次极小）前后的总亮度减小，而使得极小与极小之间的总亮度增加，也就是使得总亮度较为均匀地连续变化着。

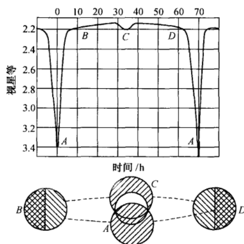


图 7-14　英仙 β 的光变曲线和两颗子星的相应位置

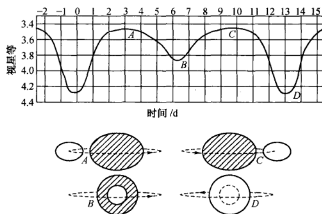


图 7-15　天琴 β 的光变曲线和两颗子星的相应位置

二、恒星质量的测定

严格地说，恒星的质量只能通过双星系统才能确切测定，表 7-3 正是在研究了许多双星系统后得到的结果，据此天文学家清楚地了解了主序星的质量。根据双星轨道速度的多普勒效应，可以测定两颗子星的速度 v_1 和 v_2。对于任何系统，只要观测足够

长的时间，我们总能直接测定周期。如果恒星是分光双星，我们就能够看到多普勒位移经历一整周所需的时间；如果它是食双星，我们就能够看到光变曲线变化经历一整周所需的时间。这种位移或变化所经历的一整周时间就是双星轨道运动的周期 P。此外，如果我们能够见到两颗子星，就能测定它们之间的距离 R。设两颗子星的质量为 m_1 和 m_2，并设它们的轨道为圆形，那么应用牛顿运动定律和万有引力定律不难导出下面的关系式：

$$\frac{m_1}{m_2}=\frac{v_2}{v_1} \tag{7-10}$$

和

$$m_1+m_2=\frac{4\pi R^3}{GP^2} \tag{7-11}$$

式中，G 为引力常数。从这两式即可直接求得单颗恒星的质量。不过，以上叙述的只是理想情况，实际上涉及的情况要复杂得多。

三、密近双星

如果双星系里的两颗子星彼此十分接近，每一颗都对改变另一颗的结构和演化起作用。在这种情况下，我们称此双星系为密近双星。

首先，考察恒星结构和运动的改变。两颗子星彼此相向的一侧，比起另一侧来，因受另一子星较强的潮汐力作用而畸变。随着恒星自转，畸变在整个恒星表面传播，导致星体内不同层的物质相互摩擦，从而耗散能量。损失的能量来自恒星的轨道运动和自转。其结果是，最后轨道成为圆形，两颗子星总是以同一面朝向对方。这是系统最低的能量状态。我们称这时的自转是同步的。这种情况在行星与卫星之间也存在，例如，月球的自转与它绕地球的轨道是同步的，月球保持以同一个面朝向地球。

更重要的是两颗子星的演化状态会与单星时完全不同。通常，双星系里质量较大的恒星将首先演化，脱离主序，成为红巨星。它对其表面物质的引力变得很微弱，在伴星的吸引下，质量将向后者转移，这会改变伴星的演化。伴星由于质量递增，将加快演化的速度，提前成为红巨星。正在失去质量的子星难免坍缩成为白矮星或中子星，甚至黑洞。于是我们可以观测到包含一颗白矮星、中子星或黑洞，另一颗正常恒星或红巨星的双星系，以及由此产生的相应的天文现象（如新星或超新星爆发、X 射线双星等）。

第四节　变星和致密星

一、变星及其分类

变星是亮度起伏变化的恒星。无论引起亮度变化的原因是几何原因(如掩食)还是物理原因(如脉动或爆炸),凡是通过探测设备能够感知其亮度变化的恒星都称为变星。除了通常在可见光波段观测的天体,随着观测手段的拓展,对变星辐射量变化的观测已延伸到其他电磁辐射波段。恒星在演化过程中,其结构和亮度通常随时间缓慢变化,但在某些特定阶段变化却相当显著。银河系内已发现大约 3 万颗变星。变星亮度既有不规则的变化,又有周期性或半周期性变化,变化幅度也相差很大。

变星按其光变原因可分成内因变星和外因变星。前者的光变是光度的变化,光谱和半径也在变,又称物理变星。后者的光度等物理量并不改变,它们是双星,光变的原因大多是一颗子星被另一颗子星周期性地掩食,又称几何变星或光学变星。

内因变星约占变星总数的 80%,又可分为脉动变星和爆发变星两大类。它们光变原因的性质完全不同。前者是由星体脉动引起的。后者的光变是由一次或多次的周期性爆发引起的。恒星的爆发过程较多地出现在恒星演化的早期或晚期。

二、造父变星和天琴 RR 型星

这两类变星都属于脉动变星。它们都可用于测量恒星和恒星系统的距离,因此都有“量天尺”的美誉。

(一) 造父变星

1784 年英国业余天文学家古德里克(J. Goodrick)发现了仙王 δ(中名造父一)的光变。后来以它作为一类变星的典型星。这类变星的光变周期大多在 1～50 天之间,光变幅度一般为 1 星等左右。伴随着光度的变化,同时表面温度、半径和视向速度都有变化(见图 7-16)。半径的变幅不大,约为 5%～10%,因而亮度变化主要是由表面温度的改变所引起的,半径变化的作用较小。一颗恒星演化到晚期时可能成为造父变星。它们的脉动是径向的,恒星外层向里和向外运动。设恒星处于平衡态时的半径为 R_0,由于某种扰动它的半径缩小,密度增加,而且压力升高。超出的压力会使外层膨

胀。正如秋千从最高点返回后会超过最低点继续前摆一样，恒星膨胀也会超过它的平衡半径 R_0。现在恒星半径大于它的平衡半径，从而压力降低，使得物质反向回落，于是这个过程就反复进行。

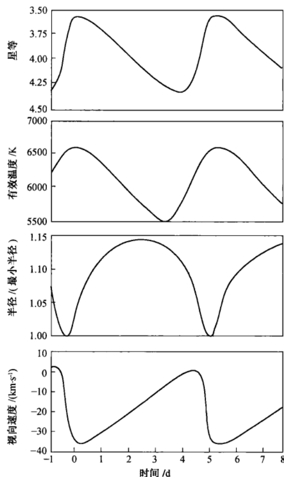


图 7－16　造父变星各物理量的变化

1908 年，美国哈佛大学天文台的女天文学家李维特(H. S. Leavitt)发现造父变星的光度与它的光变周期有关。这种关系称为造父变星的周期-光度关系，简称周光关系。造父变星的视星等 m 和周期能够测定。由其周期通过周光关系求得其光度，以绝对星等 M 表示，则代入式(7－6)即可求得恒星的距离。

（二）天琴 RR 型变星

这类变星的光变周期大多在 0.05～1.5 天，变幅 0.5^m～1.5^m。天琴 RR 是这类变星中最亮的一颗，便以它的名字命名这一类变星。它们的平均光度相当稳定，平均目视星等取为 0.6^m，与周期无关。这一特性使得它们也能指示距离。

三、金牛 T 型星

金牛 T 星是这类变星的代表星，属于爆发变星。它们的特征是在光谱中有氢的发射线和锂的谱线，光变幅度和光变周期都不稳定。以原型星金牛 T 为例，在不同时期，亮度变化差别很大。目视星等 m_v 变化的最大范围为 9.4^m～13.1^m，变幅达 3.7^m；有时变幅不到 0.5^m（见图 7-17）。观测表明，金牛 T 型星总是与星云在一起，而且有物质抛射。它们的一些观测特征起因于星周盘的活动，而且表明它们是非常年轻的恒星，正如我们前面所见。金牛 T 型星正处于通过引力收缩向主序星演变的阶段，是主序前的变星，在恒星起源和演化的研究中占有重要的地位。

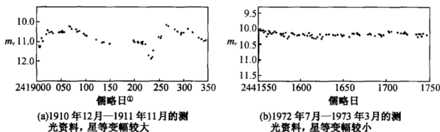


图 7-17　金牛 T 型星的光变曲线

四、新星

新星是亮度在很短的时间内（几小时至几天）突然剧增，然后缓慢减弱的恒星。亮度的增幅多在 9^m～14^m 之间，相当于光度增强数千倍至数十万倍。新星并不是新诞生的恒

① 儒略日是天文学上一种不用年和月的长期纪日法。规定以公元前 4713 年儒略历 1 月 1 日世界时 12^h 为起算点，日复一日，连续不断。

星，相反，它们是演化到晚期的恒星，只是在未增亮前是一颗很微弱的星，亮度突然增加时，“新”出现在天空。几乎所有的新星都位于双星系统中，其中一颗子星是主序星或巨星，另一颗是白矮星，两颗子星靠得很近。前者体积大，外层受引力束缚弱，在近旁白矮星潮汐力作用下，气体被拉向白矮星，在后者表面形成包层。白矮星表面附近引力场很强，下落的气体获得很大的动能。当气体掉入包层，动能转化成热能，使包层的温度和密度持续升高。当包层内的温度达到几百万 K 时，氢开始发生核反应，将白矮星的整个外壳炸飞，白矮星的亮度也随之急剧上升，形成新星爆发。尽管如此，有些新星爆发之后并不能阻止双星间的物质传输。一旦爆发结束，白矮星仍会继续吸积伴星物质。经过一段时间积累，又将产生下一次新爆发。这类新星称为再发新星。再次爆发的时间间隔一般为 8～80 年。

新星和超新星在我国古代天象记录中常称为客星。最早从公元前 14 世纪殷墟甲骨文的记载开始至近代，我国记录了“客星”68 次。银河系里的新星大部分出现在银道面内。但是，由于银道面附近星际气体和尘埃的遮掩，其中大多数观测不到，因此难以估计新星的发生率。观测邻近河外星系中出现的新星，估计每个星系每年出现 10～40颗。图 7－18 为 1975 年天鹅座新星所在天区的照片。图 7－19 展示 1992 年天鹅座新星爆发两年后的结构，它的包层正以 3×10^3 km/s 的速度向外膨胀。

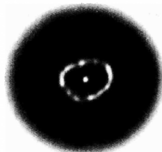
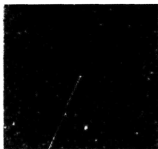


图 7－19　1992 年天鹅座新星



(a) 发亮前在该新星的位置上看不到星



(b) 该新星亮度极大时的照片

图 7－18　1975 年天鹅座新星所在天区的照片

五、超新星

超新星是爆发规模最大的变星，亮度的增幅为新星的数百至数千倍。超新星爆发时，短时间内释放出巨大的能量，将全部或大部分物质炸散，表现为天空中突然出现一颗很亮的星，在 1～2 天内亮度迅速增加数百万倍甚至上十亿倍，光变幅度超过 20 个星等，然后在几年到几十年内慢慢减弱。超新星爆发是恒星临终前的最后一次壮举，释放的能量甚至超过太阳一生辐射能量的总和。

（一）两类超新星

超新星光谱中有大量发射线和吸收线。根据这些谱线成分的不同，超新星可分为Ⅰ型和Ⅱ型两类。它们最大的区别是，Ⅱ型超新星的光谱中有很强的氢光谱线，而Ⅰ型超新星光谱中的氢光谱线几乎没有或很弱。这说明Ⅰ型超新星在爆发前必定是一颗晚期恒星，氢已经消耗殆尽了。

Ⅱ型超新星的前身星是质量大于 8 $m_{\odot}$ 的大质量恒星。在主序星阶段，其内部一直处于氢热核反应产生的气体热压力和恒星自身引力相平衡的状态，这时恒星是稳定的。当恒星中心的大部分氢经核反应变为氦后，氢燃烧产生的热压力抵抗不了恒星自身的引力时，恒星的核心就坍缩并使恒星内部的温度升高，点燃氦的核反应，使热压力又与引力达到新的平衡，如此周而复始，直至“燃烧”到核心生成铁。由于不能进行下一步核聚变反应，因此铁核就不断地收缩。当它的质量超过一定极限后会突然坍缩，在不到 1 s 的时间内，核心的电子与质子结合形成大量的中子，并产生大量中微子。星核坍缩与超新星爆发之间具体的物理联系至今尚不清楚，一种可能的途径是，在星核坍缩的过程中，大量能量被释放出来，其中的一小部分被下落的物质吸收引起猛烈的爆炸（见图 7－20），使它在接下来的几个月中成为一颗明亮的超新星。坍缩的核心将成为一颗中子星。这类超新星的前身星的质量通常小于 50 $m_{\odot}$。这类超新星的光变曲线各不相同[见图 7－21(a)]。

因天体的含氢量特征同归属于Ⅰ型的超新星，又可分为本质上完全不同的两类。

Ia 型超新星的特征表明，它们起源于低质量的恒星。Ia 型超新星与新星有不少相同之处，且都起源于双星系统。对于由一颗白矮星和一颗正常恒星（如主序星、红巨星等）组成的双星，如果两颗恒星靠得足够近，白矮星就会通过强大的引力吸取伴星的表层大气。随着物质交流的进行，堆积在白矮星表面的物质会越来越多。白矮星的质量有一个上限，即 1.44 $m_{\odot}$。白矮星的质量增大到这个极限后将变得不稳定，在内部产生剧烈的热核反应，将整个星体炸碎。这就是 Ia 型超新星爆发。Ia 型超新星爆发时星体的质量都

基本相同，因此它们的光变曲线都很相似[见图 7-21(b)]，绝大时典型的绝对星等为-19^m。所以 Ia 型超新星被称为宇宙的“标准烛光”，能用于测定遥远河外星系的距离。

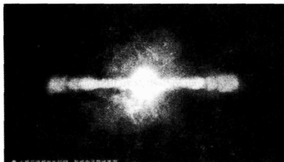
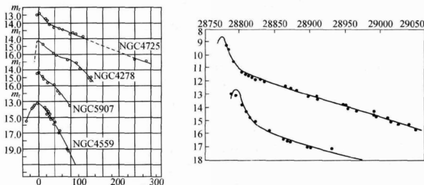


图 7-20　超新星爆发的景象



(a)4 个河外星系中出现的 4 颗 II 型超新星的光变曲线，横坐标是相对日期　(b) 星系 IC 4182(上) 和 NGC 1003(下) 中了现的两颗 Ia 型超新星的光变曲线，纵坐标是星等，横坐标是儒略日

图 7-21　超新星的光变曲线

Ib 型超新星的前身星也是大质量恒星，且它们的质量更大，通常大于 50 $m_{\odot}$。它们的演化过程类似于 II 型超新星的前身星，但一般要快速和激烈得多。它们激烈地活动，向外喷发物质，以至于氢包层脱落，露出了极高温的铁核。铁核坍缩，导致超新星爆发。最终，坍缩的核心将形成一个黑洞。

现在普遍认为，许多比铁重的元素（例如铜、锌、硒、银、碘、金等）只能在超新星的内部条件下通过核反应形成。超新星爆发时把大量物质包括重元素抛入星际空间，成为以后形成恒星和行星的原料。如果没有超新星提供丰富的各种元素，地球就不可能如此多姿多彩，也就不会有人类。超新星爆发产生的热辐射、冲击波、引力辐射、X 射线和 γ 射线等影响到周围的星际物质，有利于新恒星的孕育，甚至影响到星系的形成与演化。

(二) 超新星的记录和研究

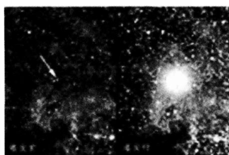
超新星爆发是银河系内十分罕见的天象。从 2000 年来我国的“客星”记录中，可以辨认出 9 次属于超新星，其中最著名的是 1054 年超新星。据我国宋朝史书《宋会要》记载：“至和元年五月，(客星)晨出东方，守天关。昼见如太白，芒角四出，色赤白，凡见二十三日。”从这段记录可知：这颗超新星于 1054 年 7 月 4 日(宋仁宗至和元年己丑)出现于金牛 ζ(天关)附近，在 23 天里白天也能看到，像金星(太白)那样明亮。由此可以估计它最亮时的目视星等约 -5^m。另据《宋史·仁宗本纪》记载，它于宋仁宗嘉佑元年三月辛未(1056 年 4 月 6 日)消失，故用肉眼能看到的时间达 21 个月。1731 年英国业余天文学家贝维斯(J. Bevis)首先用望远镜在金牛 ζ 附近看到一个云雾状天体。后来，人们根据它的外形称其为蟹状星云(彩图 20)。蟹状星云离太阳 6 500 光年，大小为 13 光年×9.8 光年，质量约为 2～3 $m_{\odot}$。它的结构，里面部分呈弥漫的星云状，发蓝色光辉，外面部分由红色的纤维构成。它还在向外膨胀，平均速度约 900 km/s。已经在从射电波到 γ 射线的各波段接收到它的辐射，而且于 20 世纪 60 年代在其中心探测到一颗脉冲星，即中子星。这证实了Ⅱ型超新星爆发，其核心坍缩后可能形成中子星。脉冲星向星云发射高速电子，输送能量。星云在 10 万年内逐渐向空间膨胀、冷却、扩散到星际空间，成为星际物质。

著名天文学家第谷和开普勒分别于 1572 年和 1604 年于仙后座和蛇夫座发现了超新星(我国也有记载)。他们做了大量精细观测。从 1604 年以来，还未在银河系内发现有超新星爆发。现代的超新星观测和研究，只能局限于河外星系中的超新星。超新星爆发时，光度极大值甚至相当于整个星系，因而用大型望远镜不难发现河外星系中出现的超新星(见图 7-22)。

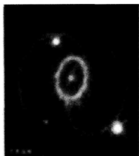


图 7-22 超新星 1998aq(它位于旋涡星系 NGC 3982 中，它的亮度一直在增加，可能是刚刚爆发后不久)

从1885年在仙女星系中发现了第一颗河外超新星以来，到20世纪末总计已发现超新星约有1 400颗。在这些河外超新星中重要的是1987年2月23日在大麦哲伦云里发现的那颗。它是自望远镜发明以来，人类首次观测到的最近的超新星，被命名为"超新星1987A"[见图7－23(a)]。大麦哲伦云是离银河系最近的河外星系，距离为18万光年。它的前身星是一颗蓝超巨星。在它爆发的光信号抵达地球之前的3 h，设于日本、美国、前苏联和意大利的中微子检测器几乎同时记录到中微子获俘事件。超新星爆发后产生一个奇特的三环结构[见图7－23(b)]。天文学家开展了对它从射电波到γ射线波段的全方位观测，获得了丰富的高质量资料，检验了超新星的理论，深化了对超新星的认识。



(a) 超新星爆发前后大麦哲伦云的局部照片，左图箭头所指为其前身星



(b) 爆发后形成的三环结构

图7－23 超新星1987A

以下三部分将分别叙述处于恒星演化最后阶段的三类天体：白矮星、中子星和黑洞，它们统称为致密星，而白矮星和中子星又称为简并星。

六、白矮星

19世纪中叶，人们发现天狼星属于一个双星，但是它的伴星天狼B质量不低而光度极小，很难发现。1915年才确定天狼B是一颗白矮星(见图7－24)。现在测定了它的表面温度为24 790 K，质量为1.034 $m_{\odot}$，半径0.008 4 $R_{\odot}$。天狼B的质量与太阳差不多，但体积只有地球的3/4。它的平均密度达2.5×10^{9} kg/m^{3}，是水的密度2.5×10^{6}倍。至今已发现了1 000多颗白矮星。亮星小犬α(南河三)的伴星也是著名的白矮星。

白矮星是一类低光度、高密度的恒星。白矮星的绝对星等在$8^{m}\sim16^{m}$的范围，密度达$10^{8}\sim10^{10}$kg/m^{3}，一颗与太阳质量相同的白矮星，大小与地球相当。这样致密的天体，引力十分强大，气体的热压力根本不足以与之抗衡，从而造成原子的电子壳层被打破，形

成自由电子气体，并由电子简并压力抗衡白矮星的强大引力而维持平衡状态。

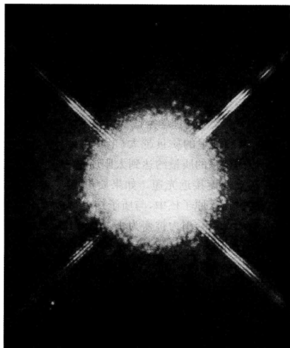


图 7－24 天狼 A 和天狼 B 的像（天狼 A 的特殊光芒是因为光阑的衍射造成的，左下角的小亮点是天狼 B）

电子简并（包括下文的中子简并）是由量子力学中的泡利不相容原理引起的。这个原理说在同一个系统里没有两个电子能够处于同一状态。在一个原子的最低能级只能放进两个电子，它们处于不同的自旋状态。第 3 个电子必然进入更高能级。这样，不断加入的电子会处于越来越高的能级。这就像一家高层宾馆的每个房间只能入住两位宾客。旅游季节来临，大量客人涌入这家宾馆，假设客人从底楼起逐层入住，后来的客人就越住越高。显然，住得越高，在地球引力场里的势能也就越高。如果电子气体内所有电子处于不相容原理允许的状态下，称这种电子气体为简并气体。在简并气体里，大多数电子的能量远大于它们在普通气体里的能量。这种高能电子也有高的动量。因此，它们作用的压力远远地超过理想气体在相同温度下作用的压力。这种高得多的压力称为简并压力。

白矮星是小质量恒星演化的归宿。一颗质量约 0.08～5 $m_{\odot}$ 的恒星，在晚期演化阶段变得不稳定，外层物质被抛向太空，留下的物质是恒星核心的遗迹，成分主要是碳和一

小部分氧。若核心部分质量小于 1.44 $m_{\odot}$，则在其耗尽内部的核燃料后，温度并不高到足以触发进一步的核聚变，从而气体压力不能高得足以支撑恒星抗衡引力坍缩。如果不是达到相当高的密度，产生一种新的压力源，那么这种坍缩将会无止境地继续下去。这个压力是由电子简并产生的。最终在电子简并压力和引力之间达到平衡，成为白矮星。然后开始一段相当长的冷却阶段，从热的白矮星演变成冷的、看不见的褐矮星。恒星在向白矮星演化的过程中会经历行星状星云阶段，它不断向外抛射大气，在周围形成一个明亮的气体环。大约 50 亿年后，太阳将经历这一过程，成为一颗白矮星。

20 世纪 30 年代，美籍印裔天体物理学家钱德拉塞卡(S. Chandrasekhar)首先建立了白矮星的理论模型。他发现白矮星的质量越大，半径就越小。这种性质与主序星的质量-半径关系截然相反。当白矮星的质量约达到太阳质量的 1.44 倍时，它的半径达到最小的允许值，内部的电子运动速度接近光速。如果质量更大，电子的简并压力就再也无法抵抗星体的引力，电子将被压入原子核中，与质子结合形成中子，星体也将继续发生引力坍缩，直到中子的简并压力可以与引力抗衡为止。通常，1.44 $m_{\odot}$ 被看成是白矮星的质量上限。这就是钱德拉塞卡极限。

一颗恒星刚形成白矮星时的温度可高达 4×10^4 K，但是由于之后没有新的能量来源，随着它向外辐射能量，一定会逐渐冷却。简并压力与温度无关，所以恒星在冷却过程中仍保持着原有大小。从白矮星冷却到成为褐矮星要历时数百亿年。

七、中子星

(一) 中子星的概念

中子星是由简并中子组成的致密星，是恒星演化的归宿之一。质量超过太阳质量的 8～10 倍的大质量恒星在不到几千万年的时间内就会通过反应耗尽自身的燃料，并往往以壮观的超新星爆发而结束其一生。在超新星爆发后，核心受到巨大压缩，正常的气体压力不能支撑它了。若其核心部分的质量在 1.44～3 倍太阳质量之间，电子简并压不能支撑它，核心的坍缩就继续下去，超过了白矮星所具有的那么高的密度。由于密度增高，电子和质子受力结合形成中子。整个星体内产生巨大的中子简并压力，与引力相抗衡，阻止了进一步坍缩，终于又一次达到了平衡状态。这样产生的天体称为中子星。

1932 年，前苏联物理学家朗道(Л. Д. Ландау)首先预言了恒星中简并中子物质的存在。1939 年，美国物理学家奥本海默(J. R. Oppenheimer)等人建立了第一个中子星模型。直到 1967 年第一颗射电脉冲星发现后，人们才真正开始了认识中子星的过程。

中子星是宇宙中已知的最致密的天体之一。1 cm^3 的中子星物质重达 10^8 t 到 10^9 t。

一颗质量和太阳相当的中子星，直径仅为 20 km 左右，而太阳的直径近 1.40×10^6 km。在这样的高密度状态下，不仅原子核已经破裂，甚至就连单个的质子也和电子结合，形成中子，使得星体内的物质几乎全部由中子组成，这就是中子星名称的由来。

中子星的表面是一层固态外壳，厚度大约有 1 km，由铁原子核和电子组成。内部主要是处于超流状态的中子。在其强大的引力压缩下，大气层的厚度仅为几厘米。年轻中子星的表面温度约 1.0×10^7 K，中心温度高达 6.0×10^9 K，中心压力高达 10^{33} kPa，是太阳中心压力的 3×10^{27} 倍(见图 7－25)。

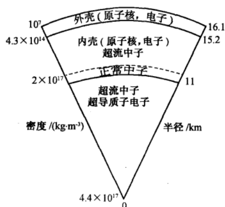


图 7－25 中子星理论模型剖面图

(二) 射电脉冲星

1967 年 7 月，英国剑桥大学的休伊什等人研制了一架射电望远镜(参看第三章第四节和图 3－22)。休伊什的研究生贝尔用这架望远镜进行巡天观测，在大量的观测记录中发现了第一颗射电脉冲星。

脉冲星是快速自转的中子星，它在高速转动下经过复杂的能量转化过程产生辐射。脉冲星辐射的能量靠消耗其自转能而来，故其自转会逐渐变慢，这就是脉冲星辐射周期缓慢变长的原因。1968 年在超新星遗迹蟹状星云的中心发现了一颗周期为 33 ms 的脉冲星，这为确认脉冲星就是转动的中子星提供了强有力的支持。图 7－26 展示蟹状星云的核心部分，它由钱德拉 X 射线天文台拍摄。这是剧烈活动的场所，蟹状星云中心的脉冲星向右上方和左下方喷射高速电子，扰动着周围的星云。除射电脉冲星外，还有在可见光、紫外线波段辐射短周期脉冲的光学脉冲星、X 射线脉冲星和 γ 射线脉冲星。

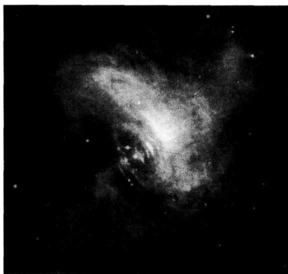


图 7-26　蟹状星云中的射电脉冲星——中子星

中子星之所以能产生脉冲辐射，与中子星表面的强磁场有关。中子星表面磁感应强度可以高达 10^8～10^9 T（相当于宁静太阳磁场的 100～1 000 亿倍）。在这样强的磁场中，中子星磁极附近的高速运动电子产生的电磁辐射具有高度的方向性（如沿着磁轴方向），并且随着中子星同步转动（见图 7-27）。当中子星的磁轴与自转轴方向不一致时，就会形成转动的束状辐射，并像探照灯一样扫过周围的空间。当脉冲星的辐射束正好扫过地球上的射电接收器时，接收器就会探测到一次脉冲。由于脉冲星在不停地自转，每自转一周，接收器就探测到一次信号，这样就会形成周期性的脉冲信号，脉冲周期正好是中子星的自转周期，这与大海上航行时看到周期性闪烁的灯塔一样，所以脉冲星的辐射被称为灯塔效应（参看图 3-23）。

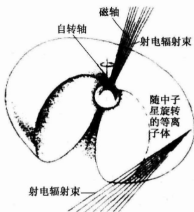


图 7-27　射电脉冲星的射电辐射束（射电辐射束与脉冲星自转轴不重合）

八、黑洞

（一）黑洞概念的提出

黑洞是这样一类天体，它的引力足够强大以致任何物体甚至光都无法从其表面逃逸。

1783年，英国地质学家米切尔（J. Michel）提出："如果一个星球的密度与太阳相同而半径为太阳的500倍，那么一个从很高处朝该星球下落的物体到达星球表面时的速度将超过光速。所以，假定光也像其他物体一样被与惯性力成正比的力所吸引，所有这个星球发射的光将被星球自身的引力拉回来。"

1796年，法国科家拉普拉斯提出："天空中存在着黑暗的天体，像恒星那样大，或许也像恒星那样多。一个具有与地球同样的密度而直径为太阳250倍的明亮星球，它发射的光将被它自身的引力拉住而不能被我们接受。正是由于这个道理，宇宙中最明亮的天体很可能却是看不见的。"他计算出了给定质量 m 的这类天体的半径为

$$R_g = \frac{2Gm}{c^2} \qquad (7-11)$$

式中 G 为引力常数，c 为光速。

1915年11月，爱因斯坦发表广义相对论。同年12月德国天文学家史瓦西（K. Schwarzschild）解爱因斯坦引力场方程，得到一个用广义相对论的弯曲空间概念描述的球状物体周围引力场的精确解。这个解表明，如果致密天体的全部质量压缩到某一半径范围内，它周围的空间就因引力而足够弯曲，以致任何物质和辐射都逃不出来。这一半径被称为史瓦西半径，其大小恰与拉普拉斯计算的一样。1968年，美国天体物理学家惠勒（J. A. Wheeler）首先提出"黑洞"一词，用来指称史瓦西所描述的这种天体。

但是，严格说来，按照牛顿理论和广义相对论描述的黑洞概念在本质上是不同的。按照牛顿理论，即使逃逸速度远大于光速，光仍然可以从星球表面射出到一定高度，然后再返回。而在广义相对论里，再讲逃逸速度就是不正确的了，因为光线根本不可能离开黑洞表面。黑洞表面就像一只由光线织成的网，光线贴着表面环绕运行，但决不能逃出来。所以说，正是爱因斯坦的广义相对论预言了黑洞的存在。

（二）黑洞的形成

（1）超新星爆发

大质量恒星(质量大于 8 $m_\odot$)演化到晚期,在耗尽所有的核燃料后,它的核心将不可避免地坍缩下去,通过一系列的核聚变反应,中心形成一个铁核,其外壳剧烈膨胀而爆发。若坍缩核的质量超过中子星质量上限 3 $m_\odot$,则中子星内部的简并压力无法抵抗引力而维持稳定的平衡态,它将无限地坍缩下去,形成黑洞。由恒星坍缩而形成的黑洞质量一般在 3 个太阳的量级。这是所谓的恒星级黑洞。

黑洞作为引力坍缩的一种可能结果而被认识是在 1939 年,那时美国物理学家奥本海默等用广义相对论方程研究一种球对称的"模型星"的坍缩。他们发现,在一定情况下,引力极其强大,没有任何力量能够阻挡星体的坍缩,直至成为一个体积为零,密度为无限大的"点"。远在达到这种状态之前,收缩的恒星就停止了与外部世界的一切联系。

(2) 宇宙演化

在大爆炸之后演化的最初 38 亿年里,发生了许多变化过程,并把影响留到今天我们所见的宇宙结构。现在人们观测到,宇宙微波背景辐射的分布并不均匀,这反映了宇宙早期物质密度的起伏。在密度较高的地方,物质能够凝聚,而且这个过程会不断地继续,最终凝聚成超大质量黑洞和星系(参见第十章 COBE 卫星和 WMAP 卫星的探测结果)。

普通物质坍缩形成第一批超大质量黑洞有一个过程。起初它们没有充分地聚集成团,也许这类物质已形成了第一批恒星,然后产生更多的恒星,终于集合成密集的星团。随着时间的进程,这种集团的内部核心将会坍缩。这时开始了小黑洞凝聚的过程。人们估计,这样一个天体一旦形成,它的质量每过 4×10^7 年左右便翻一番,在宇宙年龄(137 亿年)的期间内,即使是普通的黑洞也能增长为具有 1×10^9 个太阳质量甚至更大的的巨型天体。这样形成的黑洞称为超大质量黑洞。

英国物理学家霍金(S. Hawking)于 1971 年提出,宇宙早期形成的"原初黑洞"质量大小没有制约,各种形状和尺度的黑洞都可以在宇宙早期形成,尤其是大小如基本粒子的微型黑洞。

(三) 黑洞的主要性质

1. 视界

视界是所有试图逃逸出去的光子统统都被引力拉回的最后边界。视界将黑洞与宇宙的其他部分截然分裂,外部的物质和能量可以进入视界,而视界内没有任何物质和能量可以逃逸出去。按照广义相对论的时空弯曲理论,恒星质量坍缩到史瓦西半径以内,时空将完全封闭,光球消失,黑洞形成。图 7-28 展示一个球对称恒星引力坍缩过程中 4 个阶段光子发射的情况。图中:(a) 坍缩以前的情况,从恒星表面发出的光子可以朝任何

方向沿直线射出。(b)恒星半径开始坍缩,时空弯曲程度增加,一部分光子落回恒星表面。(c) 恒星已坍缩到临近史瓦西半径,大部分光子落向恒星表面,能够逃逸出去的光子局限在一个锥形空间里。(d)恒星已坍缩到史瓦西半径,光子能够逃逸的锥形空间完全关闭,全部光子都被囚禁起来,没有一个能够逃逸出去。

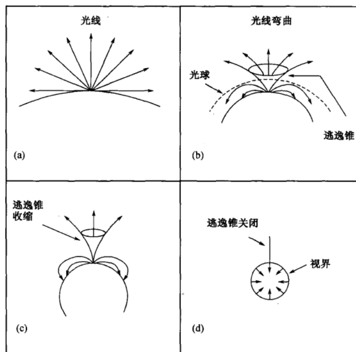


图 7-28 光被坍缩恒星囚禁的过程

2. 时间冻结

广义相对论告诉我们,在引力场里时间的进程变慢,引力场越强,时间流逝得就越慢,表现为在引力场里的时钟变慢。黑洞周围引力场十分强大,时钟慢效应会突出地表现出来。

设想一艘宇宙飞船去探测某个黑洞。当飞船逐渐接近黑洞,由于受黑洞引力的影响,相对于地球钟而言,飞船上的钟越来越慢,以至于在接近视界的时候,宇航员飞速前进,而在地球人看来,一切进程越来越慢。就在飞船一去不复返地穿过视界的时刻,宇航员向全人类致以敬礼,他的告别由电视传送给遥远地球上的观众(见图 7-29)。

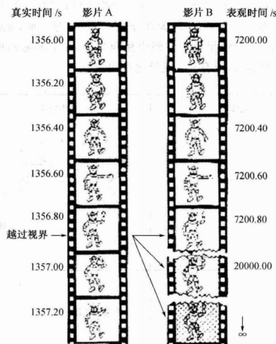


图 7－29　宇航员的敬礼

影片 A 是按宇宙飞船上的钟指示的真实时间的相等间隔拍摄的系列图像，这是飞船上的宇航员看到的情景。假设按飞船上的钟，宇航员的敬礼在第 1 356. 00 s 时开始，在第 1 357. 20 s 时结束。穿越视界是在敬礼过程之中，没有任何特别现象发生，在飞船上的探险家们看来，黑洞的边界没有任何神奇之处。

影片 B 是地球上的观众在屏幕上接收到的系列图像，按表观时间的等间隔顺序排列。开始时它与影片 A 是一样的，但随着飞船向视界趋近，它越来越慢下来。远处的观众接连收到几乎同样的图像，宇航员越过视界时的姿势似乎被永远冻结住了。

事实上地球上的观众永远看不到飞船飞临视界的最后一幕。这是因为飞船到达视界之际，时钟已经慢到了极限，信号传递的过程需要无限长的时间，时间被“冻结”了。事态发展的进程被永远定格在那里。

另一方面，在这之前，由于强大引力场产生的引力红移，使电磁波信号的波长越来越长，能量越来越弱，画面越来越模糊了。飞船到达视界时，信号的波长达到了无限大，完全丧失了传播能力。在监测者的屏幕上，什么也看不到了。

3. 黑洞无毛

相对于一般物体来说，黑洞是真正简单的物体。它只具有质量、角动量和电荷三个参量。黑洞内部的一切信息都不能通过视界传递出来，因此内部的一切细节对外界来说都是毫无意义的。

黑洞一旦形成，就失去了其前身物质的一切性状和身份，不保存以前所具有的诸多复杂参数的任何信息和记忆，保留下来的只有质量、角动量和电荷。因此，黑洞能提供给外界的只有上述三个参量。这种消繁归简的特征被形容为“黑洞无毛”（见图7－30）。

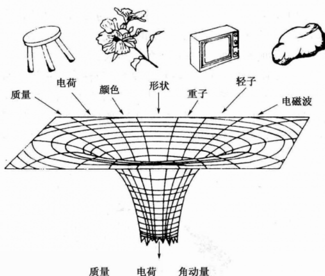


图7－30　进入黑洞的任何物体最终只保留三个物理参量

4. 黑洞蒸发

黑洞蒸发的理论是英国物理学家霍金于1974年提出来的。根据量子场论，真空不是绝对的“空虚”，真空在不断地产生着正、反粒子对，并且又很快湮灭。这些正、反粒子对的存在时间极短，又不能直接探测到，所以称为虚粒子对。

霍金认为，在黑洞周围，在虚粒子对产生的极短时间内，会出现4种可能性：直接湮灭，双双落入黑洞，正粒子落入黑洞而反粒子逃脱，反粒子落入黑洞而正粒子逃脱。最后一种可能性实现的几率最高。

反粒子带有负能量，落入黑洞以后等效于减少了黑洞的能量，而逃脱出来的正粒子

等效于从黑洞周围发射出了正能量。于是反粒子落入黑洞而正粒子逃脱的结果等效于从黑洞内部发射出了能量。这就是黑洞的蒸发。黑洞的蒸发与视界内没有任何物质和能量可以逃逸的性质并不存在矛盾。

黑洞的质量越大，蒸发就越慢，质量为 1 $m_{\odot}$ 的黑洞（约 2×10^{30} kg），一年的蒸发量仅 20^{-20} J，可维持寿命 10^{67} 年。如果黑洞的质量很小，蒸发过程将加快进行，使它们的存在寿命受到威胁。质量为 10^{12} kg 的小黑洞，每秒"蒸发"掉 6×10^{9} J 的能量，其寿命为 100 亿年。

5. 旋转黑洞造成的时空旋涡

恒星通常都有自转。当恒星坍缩为黑洞时，由于角动量守恒原理，黑洞将高速旋转。一个质量为 3 $m_{\odot}$ 的黑洞，转速可达 5×10^{3} r/s，视界上的转动速度接近光速。按照广义相对论，所有大质量的转动物体都要拖拽着周围的时空与它一起转动。旋转黑洞的这种拖拽效应，将使物体所处的时空扭曲，形成巨大的宇宙大旋涡。

旋转的黑洞比静止的黑洞具有更复杂的内部结构，包括多重视界和奇异环。在视界外面多出一个临界面，称为静止界面（见图 7－31）。在静止界面以外，时空拖拽作用是很微弱的。进入静止界面的物体，将在时空拖拽作用下，跟随旋涡做运动，越接近中心运动速度就越快。当进入视界时，任何物体都径直落向奇点，再也不能逃脱出来。

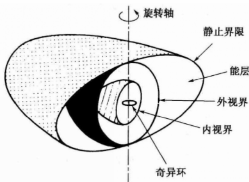


图 7－31 旋转黑洞的截面

视界与静止界面之间的区域，叫做能层。进入能层的物体将随黑洞一起高速旋转，获得很大的能量。但是，它还在视界之外，既有可能进一步落入视界，也有可能在特殊条件下逃出能层。如果逃出能层，可以把转动所获得的能量带走。这就是说，进入能层逃脱出来的物体，提取了黑洞的一部分能量。这是黑洞的旋转能量。如果黑洞的全部旋转能量被提取完了，那么黑洞将停止转动。

6. 黑洞与黑洞之间的碰撞

两个小黑洞经碰撞而结合成一个大黑洞之后，大黑洞的视界面积将大于两个小黑洞的视界面积之和。黑洞只能吸进物质而不能喷出物质，所以只允许小黑洞合并成大黑洞，不允许大黑洞分裂为小黑洞。宇宙演化的总趋势是所有黑洞的视界面积之和只会增加，不可能减少。

按照广义相对论，在两个具有强引力场的黑洞猛烈碰撞的过程中，将有引力波发射出来。由于能量守恒，引力波的能量是靠两个黑洞的总质量的损耗所提供的。这就是说，发生碰撞时，黑洞的一部分质量转化为能量，是以引力波的形式发射出去的。

（四）黑洞的探测

人们对黑洞的探测主要通过黑洞产生的两个效应：辐射效应和引力效应。由于黑洞质量这个重要信息可以借助引力形式表现出来，从而引起上述一系列效应。人们从这些效应便能观测、分析和寻找宇宙中的黑洞。下面分别按这两个效应说明探测黑洞的原理。

1. 辐射效应

黑洞具有极强的引力场，能将周围的物质（主要是气体），不断吸积到它的视界内部。这些被吸积气体的原子，在向黑洞加速运动过程中，相互碰撞，产生极高的温度。这使得原子电离，成为等离子体。这些等离子态的带电粒子在高速飞向黑洞时，要不断辐射各类电磁波，在 X 射线波段最为显著。所以通过探测宇宙空间的 X 射线辐射，能够间接证实黑洞的存在。

迄今为止，最有希望被证实为黑洞的天体是被命名为天鹅座 X-1 的 X 射线源（见图7－32）。它是在 1965 年被高空 X 射线探测火箭首次发现的，后来也被乌呼鲁卫星观测到。这个卫星发现，它的位置与一颗光学可见的恒星相对应。这颗恒星的视星等为 9 等，是一颗高温蓝色超巨星，半径为太阳的 23 倍，质量在 25～40 $m_{\odot}$ 之间，距离太阳约 8×10^{3} 光年。

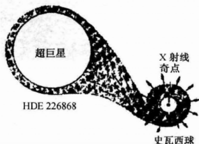


图 7－32　恒星级黑洞——天鹅座 X-1

光谱分析表明它是双星系统中的一员。在这颗蓝色巨星附近有一颗看不见的伴星，不断吸取它的物质，并加热到 1×10^{7} K 的极高温，从而成为强大的 X 射线源。蓝色巨星与看不见伴星之间有 3.0×10^{7} km 的距离，绕转周期 5.6 天，X 射线发射区的范围只有 1.0×10^{3} km。

不可见伴星的质量经反复测定，估计为 10～15 $m_{\odot}$，初步断定为黑洞。这是第一个被发现的，也是具有最大可信度的恒星级黑洞。

2. 引力效应

由于黑洞的强引力场作用，往往在黑洞周围出现大密度的恒星或其他物质分布。于是天文观测发现在一个很小的空间范围内质量和亮度比较集中。这种现象尤其在星系中心的超大质量黑洞周围更为突出。

应用这一方法的事例是对于称为 NGC 4258 的旋涡星系的研究。它在猎犬座，距北斗七星不太远。这个旋涡星系在离地球约 2.3×10^{7} 光年处，大小为 9.0×10^{4} 光年(见图 7－33)。由日本和美国天文学家组成的国际小组，应用洲际射电望远镜，观测到一个稠密分子物质形成的盘，以高达 1.05×10^{3} km/s 的速度环绕星系核旋转。

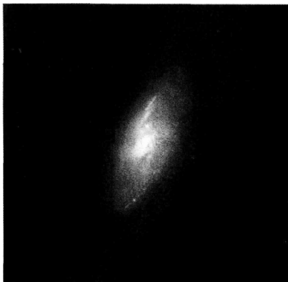


图 7－33 旋涡星系 NGC 4258

如果测定了绕行气体的速度和它对于中心黑洞的距离，那么我们就应该足以推断后者的质量。这一测量表明，大约有 3.5×10^{7}～4.0×10^{7} 个太阳集中在 NGC 4258 中心周围 0.5 光年的范围之内，这一区域内的物质密度至少达到 1 亿太阳质量每立方光年。这个蜗居于 NGC 4258 核心的天体看来是一个超大质量黑洞。

第二个例子是我们的银河系中心(见图 7－34)。那里有一个射电源，称为人马 A*，现在可以确定该核心内潜藏着一个超大质量黑洞。它与在河外星系中的黑洞相比，离我们很近，以致于在高分辨率照片的像上，我们能够鉴别围绕它旋转的单个恒星，它们在离

中心引力源只有 0.019～0.027 光年的距离处绕行。

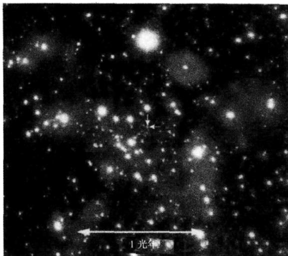


图 7－34 银河系中心

人们测定了这种恒星的绕转速度最高可达 1 390 km/s。即使我们离银河系中心远达 2.8×10^{4} 光年，还是能够实时看清它们的运动的，即能够从相隔几年所拍的照相底片上，检测它们位置的移动，从而追踪它们的轨道，显示的周期短到 15 年。应用牛顿万有引力定律，人们推断，支配这样的恒星运动所需要的质量是 $2.60\times10^{6}\ m_{\odot}$，压缩在不大于 0.019 光年的区域内。

活动星系核和类星体以及 X 射线双星可能是寻找黑洞的最佳场所。现在认为在大多数星系的中心存在超大质量黑洞。活动星系核中有强烈的辐射源，这也许是超大质量黑洞。

此外，引力波的探测有助于发现黑洞。黑洞经常以双星结构形式存在。如果一个双星系统中的两颗恒星，一颗可见，另一颗不可见，那么看不见的那颗有可能是黑洞。双星总是绕其公质心转动的，只要测出可见恒星的旋转周期，就能知道双星的周期。如前所述，根据广义相对论的引力理论双星旋转时要辐射引力波，导致转动能量的损失，随之周期亦会减小。我们从周期的测量，就能推算出另一颗不可见恒星的质量。这是引力波的间接探测。另一种情况是，大质量恒星的坍缩或黑洞吸积过程都可以产生引力波。如果探测器足够灵敏，就能监测出宇宙中的引力波信号。这是引力波的直接探测，将成为直接探测黑洞的手段。

第八章　星团和星云

17 世纪以来，天文学家通过望远镜观测到天空中有大小不一、形态各异、模糊不明的云雾状天体，直到 18 世纪晚期仍不明白它们的本质。1781 年法国天文学家梅西耶(C. Messier)把自己和他人观测发现的 103 个这类天体编成一个表，后来扩大为 110 个。该星表称为梅西耶星表，简称 M 星表。经后来鉴别，其中 57 个是星团，50 个是各种星云或星系，1 个是星云和伴生星团，2 个是双星和聚星。19 世纪的天文学家已经认识了星团和星云的区别。英国天文学家约翰·赫歇耳(John Herschel)于 1864 年发表了一本有关星团、星云的《总星表》(简称 GC 星表)。1888 年，丹麦天文学家德雷耶(J. L. E. Dreyer)对上表作了修订和增补，编制了《星云星团新总表》，简称 NGC，列出 7 840 个天体。后来德雷耶分别于 1895 年和 1908 年两次发表了 NGC 的续编《星云星团总表续编》，简称 IC，列出 5 586 个天体。编入这些表内的天体分别以 M，NGC，IC 加上在表内的编号表示，实际上包含了星团、星云和河外星系。

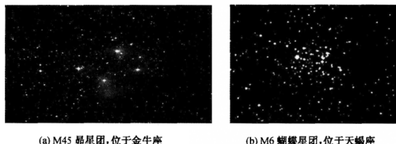
在银河系和其他星系内，散布着大量单颗恒星。但是，恒星有集群分布的特征，除了双星和聚星这类最小的恒星系统之外，还存在着由众多恒星组成的更大系统——星团和星协。星团有两种类型：疏散星团和球状星团。

第一节　星团和星协

一、疏散星团

疏散星团的形状不规则，结构松散，在几十光年的范围内通常包含几十颗到几千颗恒星，用普通的望远镜就可以分辨其中的成员星。金牛座的昴星团(M 45)［见图 8 -

1(a)]就是一个典型的疏散星团，离太阳约 380 光年，包含约 1 000 颗恒星，肉眼可以看到其中的六七颗星。疏散星团大部分分布在银道面附近。在离太阳 1 万光年范围内已发现上千个疏散星团，天蝎座蝴蝶星团(M 6)就是著名的一个[图 8－1(b)]，而银河系内疏散星团的总数目估计至少有 2 万个。在更远的距离，由于受到星际尘埃的遮挡或处于密集的银河背景场星中，星团无法辨认。



(a) M45 昴星团，位于金牛座　　(b) M6 蝴蝶星团，位于天蝎座

图 8－1　疏散星团

疏散星团内的成员星具有相同的空间运动，它们的自行方向在天球上汇聚为同一点，表明它们属于一个整体。人们利用星团成员星运动的数据可以定出星团的距离，金牛座中毕星团的距离为 44 秒差距，就是利用这种方法得到的最准确的结果。

疏散星团的直径大多在 3～30 光年的范围内，超过 30 光年的较少。疏散星团的成员除主序星外，还有大量的双星和各种变星。有些疏散星团与星云在一起，它们是年轻的。

二、星协

天文学家发现，O 型和 B 型星在天空的分布是不均匀的，在有些天区里的分布比较密集。

这种集结不是偶然现象，而是组成了一个具有物理联系的系统。与疏散星团相比，星协是结构更为松散的恒星集团，其成员星的空间数密度甚至比周围场星的数密度还要低。但星协的光谱型大致相同，而不像星团包含多种不同光谱型的恒星。发现星协不如发现星团那样直观，在星协所在的天区里不能看出恒星明显地聚集，必须认证恒星的光谱型，若着眼于 O 型和 B 型星，则能看出它们相对于其他光谱型星比较集中。星协大致呈球状，向银道面高度集中，并常位于星云附近。

由 O 型和 B 型(主要是 B0～B2 型)星为基本成员的星协称为 OB 星协(也称 O 星协)。它们的直径为 100～650 光年，成员星有十几至几百颗，在核心都有一个或几个疏

散星团。OB 星协的恒星都是年轻的恒星，它们的年龄不超过 10^7 年的量级。著名的 OB 星协，如猎户座的 OB 星群（星群是指不论有无物理联系，直观看来比较靠近的一群星），它的一个核心是位于猎户星云深处的疏散星团；天鹅座里的 OB 星群，有 5 个疏散星团作为核心。

金牛 T 型星也能构成星协，以它们为主要成员构成的称为 T 星协。它们的直径为 10～100 光年，成员星有十来颗到几百颗。金牛 T 型星尚未到达主序，常与星云有联系。著名的 T 星协，如猎户星云附近和金牛座里的 T 星协。

星协是很年轻的不稳定的恒星系统。星协内恒星的空间密度比疏散星团小许多，成员星之间的引力很弱，由于成员星的随机运动，最终将瓦解，成员星涌入银河系的普遍星场中。例如，已经观测到英仙 ζ 星协（位于英仙 ζ 附近的 OB 星协）内十几颗星的自行和视向速度，发现该星协以 12 km/s 的速度在扩张（见图 8－2）。

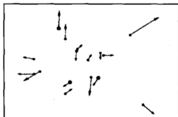


图 8－2 英仙 ζ 星协内恒星的运动，箭头的端点表示 50 万年后成员星的位置

三、球状星团

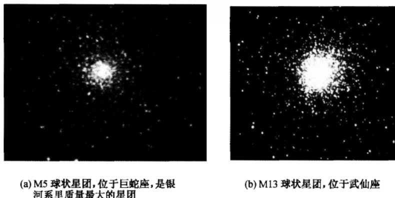
球状星团的外形呈球形或椭球形，因而得名（见图 8－3）。一个典型的球状星团直径大约为 100 光年，由成千上万，甚至几十万颗恒星组成，结构致密，越往中心恒星越密集。球状星团内的平均恒星密度比太阳附近的恒星密度高几十倍，中心密度则高出 1 000 倍左右。一些球状星团由于自身的转动而变成椭球形，如半人马座的 ω 星团（NGC 5139），它是银河系内最大最亮的球状星团，距离地球约 1.6 万光年，直径约 180 光年。

银河系内已发现约 200 个球状星团，其中大多数球状星团以银河系中心为中心，近似球对称地分布在银晕中，它们在巨大的椭圆轨道上以长达数亿年的周期环绕银河系中心旋转。球状星团是非常年老的天体，年龄大约为 100 亿年，在银河系形成的早期就诞生了。

许多球状星团中含有天琴 RR 型变星，利用后者“量天尺”的特性，对于其中发现有这

类变星的球状星团，便可利用它们来测量距离。

球状星团在天球上的分布颇为特殊，它们中的绝大多数位于以人马座为中心的半个天球上，其中有 1/3 就在人马座的天区，而这个天区仅占整个天球面积的 2%。天文学家正是从这个现象领悟到太阳在银河系内偏离中心相当远，银河系的中心在人马座方向。



(a) M5 球状星团，位于巨蛇座，是银河系里质量最大的星团

(b) M13 球状星团，位于武仙座

图 8-3 球状星团

四、星族

疏散星团和球状星团内的恒星之间还有一个重要的差别。在天文学上，人们把比氢和氦更重的元素一律称为“金属”。这个差别就是两类星团内恒星的“金属”丰度不同：许多球状星团恒星的金属丰度极低，而疏散星团恒星的金属丰度则很高。1944 年，在美国工作的德国天文学家巴德(W. Baade)把银河系内的恒星分为两个星族：金属丰度高的恒星为星族Ⅰ恒星，金属丰度低的恒星为星族Ⅱ恒星。从一般意义上来说，星族Ⅰ恒星比较年轻，是较近期形成的恒星，因为金属丰度的不同反映了每种类型恒星形成时银河系内的条件。当较年老的恒星形成时，银河系内只有氢和氦。当较新的恒星形成时，银河系已富含金属了。富裕的金属来自于恒星内的核反应过程，随后扩散到星际物质中，特别是通过超新星爆发。在银河系里，星族Ⅰ恒星在空间分布上集中在旋涡星系的旋臂区域，且常常与星际气体和尘埃相联系。星族Ⅱ恒星主要分布于核心区和星系晕中，离银道面相对较远。两个星族的恒星在物理特性、演化和空间分布方面都有明显的不同。星族的概念对于我们深入研究银河系和其他星系的结构和演化具有重要的意义。

第二节　星际物质

一、星际物质概述

散布在恒星与恒星之间广阔空间的物质称为星际物质。恒星散布于宇宙空间，在银河系中，恒星之间的平均距离为 6～10 光年，在这些星际空间充满了气体、尘埃、宇宙线和星际磁场物质。银河系中星际物质的质量约占星系总质量的 10%。星际物质在银河系中的分布不均匀，通常集中在银盘，尤其是在银河系的旋臂上，在星际气体和尘埃密度相对比较高的区域就形成了星云。

星际物质分布的空间广阔，但它们的平均密度很低，在 1 cm^3 的空间内大约只有 1 个氢原子(即 1 m^3 空间内有 10^6个氢原子)，远远低于实验室制造的真空中的气体密度。

星际物质中含量最高的元素是氢。按原子数目计，氢占星际物质总量的 90%。观测表明，氢原子通常聚集成云块，其质量大约是太阳的 0.1～1 000 倍。云块内的密度和温度都很低，每立方厘米体积中的原子只有 10～10^3个，温度只有 80 K 左右。

当温度降到 50 K 以下时，星际原子会结合成分子并聚集成团，形成比氢云更大、更密、更冷的分子云。大约一半质量的星际物质分布在分子云内。分子云是恒星形成的场所，在分子云的内部或附近区域通常有许多新诞生的恒星。

二、星际原子

通过地面和探测卫星的观测，在星际物质中发现了氢、碳、氮、氧、钙、钾、镁、硅、磷、硫、氯、氩、锰、铁、钛等元素的中性和电离原子。我们知道其中含量最丰富的元素是氢。

在星际空间中，氢原子处于中性或电离状态。氢原子大部分处于中性状态的区域，称为 HI 区；氢原子大部分已电离的区域，称为 HII 区。中性氢原子会产生 21 cm 波长的射电辐射。天文学家用射电望远镜进行探测，分析 21 cm 波长的射电辐射的观测资料，表明大多数星际中性氢原子聚集在银道面附近。在 HI 区内，气体的温度平均为 60 K，平均每立方厘米体积中只有 0.1 个原子。观测星际电离氢原子主要也用射电方法。探测发现 HII 区通常出现在 O 型、B 型星或由它们组成的星团的周围，因为只有高温恒星才发射大量的紫外光，才能使其附近的星际氢原子电离。下文将要讲到的行星状星云和发射星云都是在 HII 区。在 HII 区，电离气体的典型温度为 8 000 K，每立方厘米体积中有离子 10～10^6个。HII 区的周围是 HI 区(见图 8-4)。

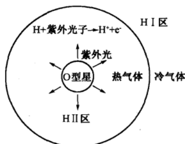


图 8-4　高温恒星周围的 HII 区和 HI 区示意图

三、星际分子

1937 年，天文学家通过光学望远镜在光学波段发现了 CH(次甲基)和 CH^+(次甲基正离子)，不久发现了 CN(氰基)分子。20 世纪 60 年代，用射电望远镜在厘米和毫米波段发现了 OH(羟基)、NH_3(氨)、H_2O(水)和 H_2CO(甲醛)；进入 70 年代，陆续发现了 CO(一氧化碳)和其他更多的分子，CO 的丰度非常高，其每立方厘米体积中有分子约 1 个。迄今为止已发现了 100 余种星际分子，其中大多数是含有碳原子的有机分子。氢是宇宙中最丰富的元素，H_2 应是最丰富的星际分子，但是它无论在光学波段还是在射电波段都没有辐射，不能借助光学或射电天文方法观测到。天文学家认识到：在存在 CO 分子的天区，必定有更多的 H_2。这样 CO 分子的 2.6 mm 谱线，作为研究星际气体的重要手段，与 21 cm 氢原子谱线具有同样重要的作用。

四、星际尘埃

(一) 星际尘埃概述

星际尘埃是广泛散布于星际空间的微小颗粒物质。颗粒平均大小在 0.1 μm 量级(见图 8-5)，在银道面附近的平均密度约每百万立方米有 1 个颗粒。通过天文观测资料的分析，已获知了关于星际尘埃成分及其结构的一些信息：除了小颗粒，许多颗粒的构成并不是均匀的，核心可能是硅酸盐和碳或铁，其外，是各种物质构成的幔，一层含有水冰和氨冰，另一层含有固态的氧、一氧化碳和氮(见图 8-6)。

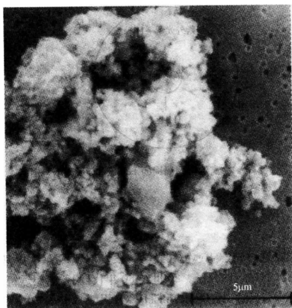


图 8-5 星际尘埃它来自于行星际空间,这是电子显微镜下拍摄的图像

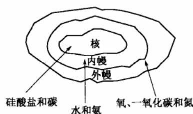


图 8-6 多层结构的星际颗粒

(二) 星际消光

星际尘埃能在宽阔的波段上吸收和散射星光,它们的复合效应是星际消光。在散射过程里,入射光子没有毁损,只是方向改变。在吸收过程里,入射光子消失,把能量留给了尘埃颗粒(见图 8-7)。星际消光对电磁波的不同波长影响不同,蓝光减弱得比红光厉害。星光在经过星际消光作用后,不仅亮度减弱,而且颜色偏红。

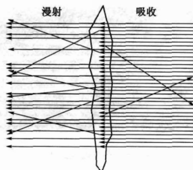


图 8-7　光线在星际尘埃中的散射和吸收(光线从右边入射，被吸收后阻止在星云里，光线被散射后改变了方向。散射或吸收的光线用不同方向表示，如图中所示)

第三节　星　　云

星云是由气体和尘埃组成的云雾状天体。一般星云每立方厘米体积中有 $10^1 \sim 10^3$ 个氢原子。弥漫于广阔宇宙空间的星际物质密度相对较高的区域就形成了星云。星云最初是指除行星和彗星以外的弥漫状天体。由于早期望远镜的分辨能力有限，一些星团和星系也曾被划归为星云，例如，作为河外星系的仙女星系也被称为仙女座大星云。

各种星云中的化学元素丰度相当类似，与宇宙元素丰度一致，由于星云的物质密度和温度各不相同，星云的外观千姿百态，有的形如马头，有的状如玫瑰，还有的酷似蚂蚁等。根据星云是否发光，星云分为发光的亮星云和不发光的暗星云两类，亮星云又包括发射星云、反射星云(这两类又称为弥漫星云)、行星状星云和超新星遗迹。

一、发射星云

发射星云是高温的气体云，光谱呈在弱的连续背景上有许多亮的发射线。星云的形状大多很不规则，且往往没有明确的边界，物质无规则地充盈其间，呈弥漫状，所以又称弥漫星云。发射星云内部至少有一颗或几颗炽热的 O 型星或 B 型星。发射星云中的激发源是深埋在星云中的高温年轻恒星。在恒星强烈的紫外线照射下，星云物质受激发而发光(见图 8-8)。

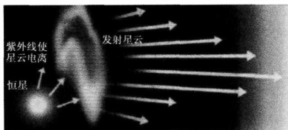


图 8-8 发射星云的成因

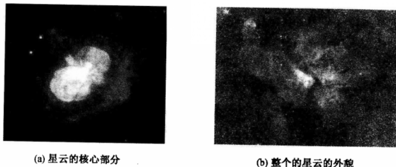
猎户星云又名 M 42 或 NGC 1976，形似一个开放的棉桃（参看彩图 19），距离约 1 500 光年，直径约为 16 光年。它位于猎户座三星的下方、"佩剑"的中间，亮度为 4^m，既是发射星云又是反射星云，在晴朗无月的夜晚能用肉眼辨认。该星云最亮的部分有一小群 O 型和 B 型星。星云中的氢原子被这些高温恒星的紫外辐射电离，发出红色的光辉。猎户星云的质量估计约 $10^2 m_\odot$，最亮部分每立方厘米体积中的原子达 10^4 个（是星际物质平均数密度的 1 万倍，但只是地面上空气分子密度的数千万亿分之一），温度约 8×10^3 K。用射电天文方法探测到它只是一个更巨大的星云中被高温恒星照亮的一小部分。这个大星云的直径达 300 光年，质量为 $10^4 \sim 10^5 m_\odot$ 之间。我们前面已经提到猎户星云是恒星诞生的摇篮。又如位于天鹅座的北美星云（NGC 7000）和鹈鹕星云（IC 5067）（见图 8-9）以及位于麒麟座的玫瑰星云（NGC 2238，彩图 21）都是发射星云的著名例子。



图 8-9 北美星云（左）和鹈鹕星云

船底座 η 星云是一个颇为特殊的亮星云（见图 8-10）。船底座 η 是一颗大质量恒星，质量达 100 $m_\odot$。这么大质量的恒星活动十分剧烈，温度极高，光度是太阳的 500 万

倍，物质不断地从表面溢出，在周围形成云，并向四周扩散。在大约 150 年前，它还爆炸性地喷发物质，从而构成了现在所见的结构，当时它是南天最亮的恒星之一，预计它在不久的将来还会发生爆炸。



(a) 星云的核心部分　(b) 整个的星云的外貌

图 8－10　船底座 η 星云(它是恒星船底座 η 爆炸性地喷发物质形成的特殊星云)

二、反射星云

反射星云通过反射和散射附近亮星的星光而发亮，它们的可见光光谱与照亮星云的恒星光谱十分相似。当星光与星云中的尘埃颗粒相撞时，其中一部分星光被尘埃吸收，另一部分则被散射回星际空间(见图 8－11)。

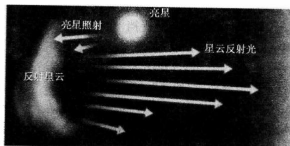


图 8－11　反射星云的成因

实际上，反射星云与发射星云并没有本质的区别，也是一种弥漫星云，它们之间的光谱特征是由照亮星的特征决定的。对于反射星云，照亮星的温度较低，缺乏强烈的紫外辐射，因而不能有效地激发星云中的原子，在光谱中不出现发射线。昴星团近旁的星云(见图 8－1)是典型的反射星云。位于人马座的著名的三叶星云(M 20，NGC 6514，彩图

22)既是反射星云,又是发射星云。

三、暗星云

暗星云是不发光的云雾状天体,表现为分布在天空中的形状不规则的暗黑区域,它们一般是致密、低温的分子云。在暗星云附近没有亮星照亮它们,同时暗星云中致密的气体和尘埃物质遮挡了背景恒星或亮星云的光线,于是就在背景恒星或亮星云的背景中看到了暗星云。暗星云是恒星诞生的主要场所(见图 8-12)。



图 8-12　暗星云的成因

沿着银河可以看到很多没有星星的黑暗区域,例如在天鹰座和武仙座之间银河的"分叉"(见图 8-13)和位于蛇夫座的 B68 暗星云(见图 8-14),都是在银河密集恒星背景衬托下的暗星云。如果在亮星云的视线上,正好有一个暗星云,那么由于暗星云的遮挡,在亮星云的照片上会出现一些暗的"空洞"或"裂缝",从而能察觉暗星云的存在。例如,三叶星云(彩图 22)的得名,就是因为在它的像上出现分叉的"裂缝",将整个像分成三片,而这裂缝正是位于该星云与我们之间的一个暗星云。更著名的例子是位于猎户座 δ 星南侧的马头星云(见图 8-15),其背景上的亮星云把它的轮廓衬托得惟妙惟肖,它是一个很大的暗星云的一部分。外界辐射穿透不到这个暗星云的中央去,其中央得不到加热,估计温度大约只有 10 K。



图 8-13　银河的分叉

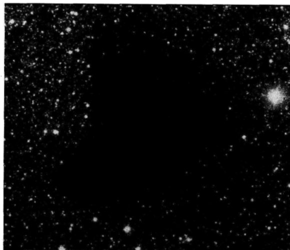


图 8-14　B68 暗星云



(a) 在亮星云背景上的形象



(b) 放大像

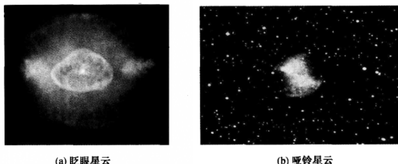
图 8-15　马头星云

四、行星状星云

当小质量或中等质量（小于 $8m_{\odot}$）的恒星演化到红巨星阶段，星体会变得很不稳定。随后中心天体收缩，外层向外膨胀。在这过程中抛出气体包层，这些气体以 20～50 km/s 的速度向外膨胀，形成行星状星云。位于星云中心的恒星残骸最终坍缩成为一颗白矮星。行星状星云被中心高温恒星的紫外辐射电离，并产生再辐射，故它们实际上是发射星云的一种。

在形态上，行星状星云有一定的对称性，边缘较清晰。行星状星云通常在几千年内就会弥散到星际空间中。银河系内已观测到的行星状星云有 1 000 多个，它们向银道面和银河系中心集聚，整个银河系中估计有 10^4～10^5个。

行星状星云在小望远镜里呈现模糊不清的斑点状，正像一颗行星。当18世纪80年代英国天文学家威廉·赫歇耳观测到它们时，就这样去称呼它们。其实它们的名称与它们的本质毫不相干。后来发现许多行星状星云的形态并不都呈现具有圆面的行星状。图8-16给出位于天鹅座的行星状星云眨眼星云（NGC 6826）和位于狐狸座的哑铃星云（M27，NGC 6853）。彩图23和24分别给出猫眼星云（NGC 6543，位于天龙座）和8字形星云（NGC 3132，位于船帆座）。



(a) 眨眼星云　　(b) 哑铃星云

图8-16　行星状星云

行星状星云表面亮度很低，直径的范围为0.1至几光年，质量为$0.01 \sim 1m_{\odot}$，星云内电子和原子一般为每立方厘米体积中有$10^4 \sim 10^6$个。在许多行星状星云的中央可以观测到一颗高温恒星，但也有的观测不到，这可能由于物质稠密，中央星被星云覆盖，或由于中央星太暗，不能辨认。这种高温恒星是红巨星的外壳抛出后留下的高温核心，几万年之内光度和温度大幅度下降，而形成的一颗白矮星。

五、超新星遗迹

大质量恒星在死亡时通过超新星爆发抛出大量物质，超新星遗迹就是这些抛出物在向外膨胀过程中与星际物质相互作用而形成的气体星云。有些超新星遗迹在光学波段表现为环状或不规则的星云，但绝大部分超新星遗迹是通过射电手段探测到的。图8-17所展示的仙后座A是仙后座里最明亮的射电源，它是一个超新星遗迹，就是1572年第谷发现的"仙后新星"的残留物。

银河系内的超新星遗迹在形态上可分为两类：一类具有明显的环状结构，另一类形态不规则，且中心增亮（如蟹状星云，参见彩图20）。超新星遗迹内的气体普遍呈现纤维状的结构。在与蟹状星云类似的超新星遗迹中往往隐藏着一颗快速转动的脉冲星，脉冲星通过发射高速电子不断向星云注入能量。环状超新星遗迹中心一般没有脉冲星，能量

来自超新星爆发产生的激波。超新星爆发后气体以 $1\times10^4\sim2\times10^4$ km/s 的速度向外膨胀。大约 50～100 年后抛射气体开始扫过星际物质并逐渐减速，形成一个环形气壳。经过大约 10 万年的膨胀与冷却过程后，超新星遗迹逐渐弥散到星际空间(见图 8-18)。它包含着过去曾经构成恒星的大部分物质。在年轻的超新星遗迹里，我们还能看到被抛出物质的膨胀。这些遗迹很重要，因为它们把在恒星内核合成的产物扩散到星际物质里去。在那里，这些“金属元素”丰富的物质将结合到下一代恒星里去。这说明了为什么那些在银河系历史里形成较晚的恒星比老龄恒星有更高的金属丰度的原因。

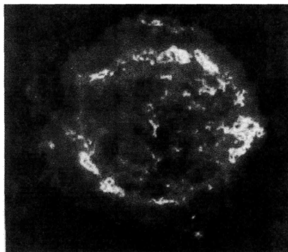
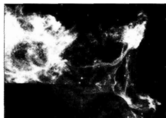


图 8-17　仙后座 A 射电源的射电像



(a) 全景图



(b) 其中一部分的特写镜头

图 8-18　帷幕星云

第九章　星系和星系集团

第一节　银　河　系

一、银河和银河系

银河是人人熟悉的天空景象。尤其在夏、秋季的夜晚，如果晴朗的天空且无月亮，又远离城市灯光，那一袭明亮的光带高悬天空，显得特别灿烂（见图 9－1）。它从北边的地平线向上延伸，经过头顶，向南方一泻千里，在南方地平线上的人马座里既宽又亮，似乎汇成了宽广的浩荡巨流，气势磅礴，震人心魄。其实，它与地平线之下的另外一半（其中大部分能在冬、春季看到）形成了环绕整个天空的一圈光带，不过银河在冬、春季看到的另一半显得比较暗淡而狭窄。它的中线大致上是天球上的一个大圆（见图 9－2）。这条光带就是银河。在我国古代银河又称天河、银汉、星河等，在西方则称之为“牛奶路”。

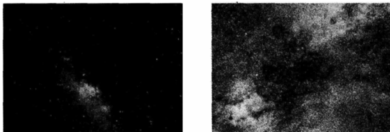


图 9－1　天空的两段银河

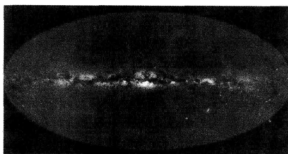


图 9－2　银河的组合像

注：这是不同季节和纬度带上拍摄的银河像的组合图，显示星团、气体和尘埃带以及明亮发光中心的位置。右下的两个不规则亮斑是大、小麦哲伦云（银河系的伴星系）

伽利略第一个用望远镜发现了这条明亮的光带乃是由无数恒星组成的。后来，有一些学者揣测银河构成了一个巨大的恒星系统，太阳与其附近的恒星也是这个系统的一部分，而且居于中心。18 世纪后期，威廉・赫歇耳应用望远镜通过恒星计数的方法，首次通过观测提出了这个恒星系统的一幅扁而平、轮廓参差、太阳居中的结构图（见图 9－3）。20 世纪初，天文学家把直观上表现为银河的这个扁盘状恒星系统称为银河系。

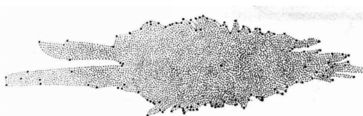
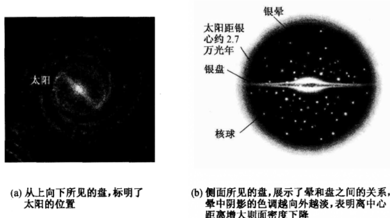


图 9－3　威廉・赫歇耳认证的银河系

1915 年，美国天文学家沙普利（H. Shapley）注意到球状星团在天空的分布特殊，在人马座方向数目最多。对于这种奇特的分布，有两种可能的解释：其一是认为太阳位于银河系的中心（简称银心），而球状星团在银河系内的空间分布对于太阳（即银心）确实不对称；其二是认为球状星团相对于银心作对称分布，而太阳位于远离银心的地方。沙普利通过观测球状星团里的造父变星和天琴 RR 型变星测定了许多球状星团离太阳的距离，由方向和距离得出它们的空间分布。他假定球状星团空间分布的中心是银心，它们分布于银晕之内，构成了银河系的一个子系统，这样的假定是更加合理的。由此他计算了太阳离银心的距离。1918 年，他提出太阳不在银河系中心的结论。这个结论意味着继

哥白尼之后，人类又一次破除了自己位于宇宙某个中心位置的观念，具有重要的学术和思想意义。

现在人们已认识到银河系是一个庞大的天体系统。实际上，银河系内有 $2\times10^{11}\sim3\times10^{11}$ 颗恒星。人类赖以生存的太阳只是银河系内一颗极其普通的恒星。银河系的可见质量约为太阳质量的 1×10^{11} 倍，其中恒星约占可见质量的 90%，气体和尘埃组成的星际物质约占 10%。银心在人马座方向。太阳虽远离银心，但位于扁盘的对称面附近，因而从地球上观看，沿盘面方向（即银河上）的星很多，偏离盘面方向（即银河以外的大部分天空）看到的星很少（见图 9－4）。恒星彼此相距很远，离太阳最近的恒星是半人马座比邻星，与太阳相距 4.22 光年。恒星种类繁多，太阳和另外数千亿颗恒星连同它们的行星系统，以及众多的星云和星际物质，共同构成一个庞大的天体系统，即银河系。



(a) 从上向下所见的盘，标明了太阳的位置

(b) 侧面所见的盘，展示了晕和盘之间的关系，晕中阴影的色调越向外越淡，表明离中心距离增大则面密度下降

图 9－4　银河系的俯视和侧视图

二、银河系的形态和结构

（一）概况

银河系大体上由银盘、银河核球和银晕三部分构成。银盘是银河系的主体。从外形看，银盘是一个中间厚，边缘薄的扁盘，直径约 8.2×10^4 光年，中心厚度约 4.2×10^3 光年，自中心向边缘逐渐变薄。从整体上看，银盘非常薄。年轻的恒星和星际气体、尘埃云等主要分布在银盘上。银盘中心是一个隆起的近似于椭球形的银河核球，半径约 1.2×10^4 光年。银河核球的中心称为银核。银河核球内的恒星分布十分密集，它们基本上是

年老的小质量恒星。

（二）银盘和旋臂

银河系是一个棒旋星系，属 SBbc 型，有英仙臂、猎户臂、人马臂和膨胀臂四条旋臂。旋臂是银盘内气体、尘埃和年轻恒星集中分布的地方。由于太阳系的位置离银道面不远，观测者向周围看到盘状的边缘部分是一个带形天区，在这个天区内恒星的投影最密集，这就是人们所看到的银河。

氢是银河系内分布最广泛的物质，而且是恒星诞生的场所，根据对银河系内 HI（指中性氢）探测，定义了银盘的厚度。在银盘上下取两点，HI 的密度从银盘平面中部到这两点下降至一半，通常把这两点间的距离作为银盘的厚度。在太阳轨道上，HI 层的厚度约 1 000 光年。图 9－5 是从侧面所见的银盘，展示了银盘各处厚薄的态势。从图中可见在接近银盘边缘，随着离银河中心越远，银盘变得越厚。这称为银盘的“侧倾”。此外，天文学家发现盘并不是平坦的，它在相对的两侧边缘分别向上和向下弯曲，称为“翘曲”。银盘一般分为薄盘、厚盘和气体盘。薄盘由年轻和中年恒星组成，厚度约 300～900 光年。厚盘主要由老年恒星组成，厚度约 2.5×10^3～5.0×10^3 光年。气体盘在太阳处的厚度约 800 光年，厚度向外增加，在外边缘达 9.8×10^3 光年。空间望远镜的新观测确认，银盘中央有棒。从棒的两端向外伸出旋臂。银盘主要由旋臂构成，旋臂内集中着大量热的年轻恒星、气体和尘埃，是活跃的恒星形成区。



图 9－5　银盘的侧视图

（三）核球和银核

银河系的银盘与中央区域连接的凸起部分是核球，半径为 1.0×10^4～1.2×10^4 光年，它由扁球形的恒星聚集体与气盘组成。核球内的恒星大多为天琴 RR 型星、晚型星和红巨星。它们比银盘中的恒星年老，但比银晕中的恒星年轻。核球内的气体主要是 H_2 分子。

核球的中央是银核。银核在天球上位于人马座方向，是一个很强的射电源。银核不止是一个几何位置，还是有异常活动的场所，这里所称的银核是银河系中心 1.5×10^3 光年范围之内的区域。由于太阳与银核之间星际尘埃对可见光有严重的消光作用，研究银核只能在射电、红外、X 射线和 γ 射线波段上进行观测。在射电和红外波段能测到分子

云和尘埃的温度和密度。与银河系内其他地方的巨分子云相比，在 600 光年之内的分子物质相当温热和稠密。典型的温度是 70 K，每立方厘米体积中分子数大于 10^4 个。这是在正常分子云核心里的条件，但是它们广泛地存在于这些云的整体之内。分子物质的量可能达到 10 $m_\odot$。X 射线的探测，发现了从银心有向外的发射，表明温度高达 10^7～10^8 K。有人推测这样的高温是由于过去的爆发事件产生的。这一事件可能是大量的超新星爆发，继之以恒星形成的大规模浪潮。显示在银核的 3 光年区域内，具有恒星形成的独一无二的条件。已经发现了一个 $10^6 m_\odot$ 的老星团和 1 个 $10^4 m_\odot$ 新星团。

在银核附近分布着银河系中最密集的恒星群，并有电离气体和尘埃。在银核周围 1 光年的范围内包含有相当于太阳质量的 500 万倍的物质。普遍认为，在银核区域有一个超大质量黑洞，现在已经测定了它的质量为 $2.6\times10^6 m_\odot$。这个黑洞通过吸积周围的恒星和气体，表现出银核的各种活动现象。

（四）银晕

在银盘外边包围着一个由少量恒星和星际物质组成的球状银晕，直径约为 25～40 万光年。银晕内的恒星集中在一些致密的球状星团内，它们沿着巨大的椭圆形轨道在各个方向上绕银心转动。这些恒星在银河系形成后不久就诞生了，属于年老的星族 II。银晕的质量比银盘、核球和银核大得多。但银晕内可见的天体并不多，因而它包含的大多是看不见的暗物质。估计暗物质晕的质量为太阳的 6.0×10^{11}～3.0×10^{12} 倍，向银心方向密集。

2007 年天文学家们获得了一项出乎意料的发现：银河系的晕中，包含着两个化学性质和动力学性质截然不同的星族。略微扁平的内晕从银河系中心向外延伸到 5.0×10^4 光年左右，其中恒星的平均公转方向和速度与银盘和旋臂的自转大致相同。而在 6.5×10^4 光年以外的球状外晕之中，恒星倾向于反向公转，速度是前者的两倍。外晕恒星的重元素丰度大大低于内晕恒星。所有这些发现都表明银晕是在原始银河系与较小的星系发生碰撞，在将它们扯碎驱散的过程中，由许多不同成分的恒星聚集构建而成的。

在银晕的外面可能还有一个更加巨大的银冕。

三、银河系的自转和质量

（一）自转曲线

银河系的所有物质都在绕着通过银心并且垂直于银道面的一条轴线旋转。假如银

河系是一个刚体，所有天体、气体和尘埃的旋转周期都相同。然而，观测发现，靠近银心物质的旋转周期比远处物质的周期要短。这是一种在万有引力作用下的很自然的情况。例如，太阳系的行星也显示同样的性状：水星环绕太阳的周期短于地球，地球又短于木星，等等。银河系在自转时，各处的轨道周期与到银河系中心的距离有关，我们称这种自转为较差自转。

在较差自转中任何质点的轨道周期取决于它所环绕的质量和轨道半径。天文学家应用行星环绕太阳的轨道周期和半径求太阳的质量；同样，可以用与银心不同距离处的银河系绕银心运动的轨道周期去了解银河系的质量分布，直至求出整个银河系的质量。天文学家测量了银河系内不同半径处的银河系绕银心运动的自转速度，这相当于测出与银心不同距离处的银河系绕银心运动的周期，因为由半径可以算出周长，周长除以速度即得周期。自转速度随银河系半径变化的曲线称为自转曲线，图 9-6 展示 20 世纪 80 年代测定的银河系自转曲线。这条自转曲线测量的范围从银心直到银河系外围半径 20 千秒差距(相当于 6.5×10^4 光年)处。曲线明显地分为两段。在银心附近，曲线几乎成直线状陡峭上升，而此后除两个不大的起伏外几乎趋于平坦。银河系自转导致太阳以 220 km/s 的速度，在一个大致近于圆形的轨道上绕银心转动，转动一周大约需要 2.4×10^8 年。

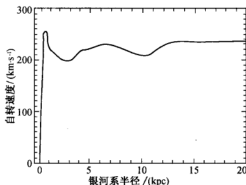


图 9-6 银河系自转曲线

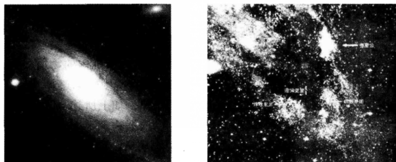
(二) 银河系的质量

我们知道，一个天体系统绕其中心的转动规律取决于系统内的物质分布。考虑两种极端的情况，如果物质高度集中在中央，像太阳系那样，则转动遵循开普勒定律；如果系统呈球形，且物质均匀分布，则服从刚体转动规律。如上所述，如果测定了系统的自转曲线，了解了系统内各处转动的规律，人们可以依据物理定律推算物质的分布，进而求出整个系统的质量。这样求出的质量称为引力质量。20 世纪 60 年代，人们曾经根据当时测得的银河系自转曲线求出银河系的质量为 $1.8\times10^{11}m_{\odot}$。70 年代以后，情况有了很大的变化，自转曲线的测定有了新的结果。图 9-6 显示，在银心附近(直到半径约 1.2 千秒差距处)由于物质高度集中在核球的区域内，呈现刚体转动的状态。

而之后的速度明显地偏离开普勒运动，表明银河系的物质，并不高度集中在中央，在外围广大的区域里分布着大量物质。天文学家正是根据银河系自转曲线，建立了银河系结构模型，从而认为存在一个很大的银晕。大体上说，银河系的总质量达 $2\times10^{12}m_{\odot}$，比以前推算的大了 10 倍以上。银晕伸展到离银心 100 千秒差距的地方。在新建立的模型中，银晕的质量比银盘、核球和银核大得多。但银晕内可见的天体并不多，因而它包含有大多是看不见的暗物质。人们曾经认为这些暗物质是低光度的恒星和死亡了的恒星——白矮星、中子星和黑洞等。但它们的总量远不足以说明问题。天文学家在河外星系内和星系团内都发现了暗物质的存在。暗物质的问题将在第十章进一步讨论。

第二节　河 外 星 系

下面我们将离开我们所在的星系——银河系，转向更大尺度的范围。我们将首先考察其他星系。研究其他星系极大地有助于我们研究银河系。星系是由几亿到上万亿颗恒星以及星团、星云和星际物质构成的庞大的天体系统，其空间尺度通常在几千至几十万光年。星系大小不一，质量和光度相差很大，形态和物质构成也不尽相同。银河系只是星系世界中的普通一员，通常把银河系以外的其他星系称为河外星系，简称星系。然而在很长时期里，并不明白我们在天空看到的许多星云，例如旋涡星云，其实就是星系。从它们的形态来看，这些星云很可能被当做银河系里的天体。这个问题于 1924 年由美国天文学家哈勃(E. Hubble)解决了。哈勃研究了三个旋涡星云(包括仙女座大星云，图 9-7)里的造父变星，明确提出它们的距离比银河系的尺度来得大，这就得出了一个肯定的结论，即它们是在银河系之外的其他星系。随着这项工作，哈勃作了关于其他星系的大量前沿性研究，开创了河外星系的研究领域。



(a) 仙女星系　　　　(b) 外围的造父变星

图 9-7　仙女座大星云

一、星系的类型

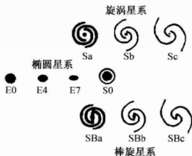
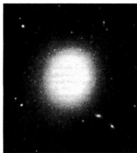


图 9－8　星系的哈勃分类

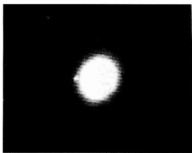
哈勃在其研究中立刻认识到不是所有旋涡星系都有相同的形态。进而是他又发现了一些不具有旋涡结构的星系。哈勃把他所研究的星系按它们的形态分类。这是星系分类中最基本的方法，一直沿用至今。哈勃曾经认为从椭圆星系到不规则星系，展示了星系演化的序列。深入的研究表明事实并非如此。宇宙中存在数以千亿计的星系。从形态上看，星系可分为四类：椭圆星系、透镜状星系、旋涡星系和不规则星系，如图 9－8 所示。旋涡星系又可分为(正常)旋涡星系和棒旋星系两族。透镜状星系和旋涡星系均有星系盘，统称为盘星系。

(一) 椭圆星系

椭圆星系的两个例子示于图 9－9。



(a) M87 在室女座，它是一个巨椭圆星系，E0 型。距离 6.0×10^{7} 光年，直径达 50 万光年，它也是一个活动星系。靠近星系边缘的模糊斑点是球状星团，右下角的长条是喷流



(b) M49 在室女座，E1 型，距离 5.0×10^{7} 光年

图 9－9　椭圆星系

椭圆星系呈椭圆形或正圆形，在哈勃分类中椭圆星系又分成 8 个次型，范围是从 E0

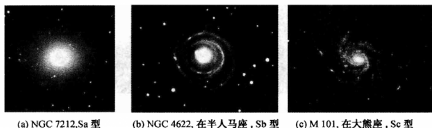
(圆形)到E7(最扁)。这类星系没有旋涡结构,通常中央较密,包含一个核,但也有些并没有核。它们的形状彼此相似,主要差别在于扁度和表面亮度向外的下降率不同,以及有不同的大小。椭圆星系中最普通的一类称为矮椭圆星系,它们是最小的。它们的典型大小是几千至上万光年,质量是 $10^6 \sim 10^7 m_\odot$。最壮观的是巨椭圆星系,它们延展到几十万光年,质量约 $10^{12} \sim 10^{13} m_\odot$。

椭圆星系内包含的气体量很低。星际物质的质量低于可见恒星质量的1%。这么低的气体含量表明椭圆星系不可能形成旋涡星系。椭圆星系里金属的丰度比较高,没有O型或B型星,成员星主要是质量小于太阳的矮星。

(二) 旋涡星系

具有旋涡结构的星系叫做旋涡星系。在这类星系中,从中央向外缠卷两条或更多条称为旋臂的条状结构。旋臂位于很薄的、称为星系盘的平面内。旋涡星系分为两族:正常旋涡星系和棒旋星系,前者的中央部分呈椭球状,以字母S表示,通常就简称为旋涡星系;后者的中央部分呈棒状,以字母SB表示。在哈勃分类中,这两族旋涡星系都按照核与盘的相对大小和旋臂由紧到松的程度分为3个次型,它们分别用Sa,Sb,Sc和SBa,SBb,SBc表示。各个次型之间的界限不很明确,往往还可分得更细。例如Sab表示介于Sa和Sb之间的次型。如上所述,我们的银河系就属于SBbc型的棒旋星系。

旋涡星系中央部分称为核球,其中的天体与椭圆星系类似。旋臂内充满了星族I天体,尤其是气体、尘埃和年轻恒星。正常旋涡星系和棒旋星系的一些例子分别示于图9-10和图9-11以及彩图25和彩图26。



(a) NGC 7212,Sa 型　(b) NGC 4622,在半人马座,Sb 型　(c) M 101,在大熊座,Sc 型

图 9-10　各种类型的旋涡星系

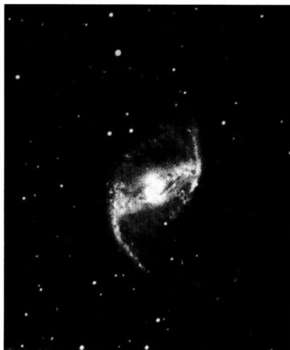


图 9-11　棒旋星系 NGC 1530

（三）透镜状星系

透镜状星系介于椭圆星系和旋涡星系之间，是没有旋臂的盘星系（见图 9-12）。它们有明亮的核球和扁盘，但没有旋臂，形似透镜，其中的核球大致上与盘的其余部分一样大，使得星系的形态几乎呈球形。气体透镜状星系的扁盘亮度分布与旋涡星系的类似，有一部分包含气体和尘埃，哈勃也把它归入旋涡星系，用符号 S0 表示。然而，大多数透镜状星系的气体和尘埃含量比旋涡星系少得多。



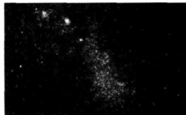
图 9－12 透镜状星系 NGC 2855

（四）不规则星系

不规则星系没有旋涡结构，形状不对称，不存在可辨认的核（见图 9－13），用符号 Irr 表示。不规则星系分为两个次型，符号分别为 Irr Ⅰ和 Irr Ⅱ。Irr Ⅰ型的不规则性是固有的，能分辨出恒星和星云，气体的相对含量超过旋涡星系。典型的 Irr Ⅰ型不规则星系如大、小麦哲伦云。Irr Ⅱ型只具有整体上无定形的形态，通常有很明显的尘埃条。它们的不规则性是由某种扰动引起的，例如星系核的爆发，星系之间的大碰撞或相互作用等（参看本节第四部分“星系的碰撞”）。



(a) 大麦哲伦云



(b) 小麦哲伦云

图 9－13 不规则星系

二、活动星系

活动星系的分类缺乏统一的规范，现就其荦荦大端，分述于下。

（一）星暴星系

在红外波段去观测星系，发现许多星系发射超强的红外辐射，它们的红外光度通常比光学的大几十甚至上百倍。我们已经知道成为恒星形成区的巨分子云会发出大量红外辐射。这是由于分子云内大批新形成恒星的紫外辐射加热了云内的尘埃，转化为红外辐射。红外辐射超强，说明这些星系有很高的恒星形成率，从而不久将耗尽所有的星际物质。由此人们认为这种超量的恒星形成是短期现象，所以称为星暴。但是，这类星系中恒星大量形成的活动区域比星系核大得多。彩图 27 所示 M 82(又称 NGC 1365)是星暴星系的像，它是这类星系的原型。图示大量正在形成过程中的恒星向外喷出的星风将中央区的物质吹向空间，形成了长达 1 万光年的物质喷流，其红外光度是其光学光度的 20 倍。图 9－14 是星暴星系 NGC 4314 的像，它的距离为 1.3×10^7 秒差距。这是一张合成像，由通过紫外、蓝色、可见光、红外和 Hα 滤光片拍摄的各个像合成的。它显示大部分新近形成的恒星在一个环绕星系中心的小环内，也可以看到环内的尘带，这是巨分子云的所在。在它的中心也探测到性质属超新星遗迹的射电辐射，这说明所形成的恒星中一定包含大质量恒星。

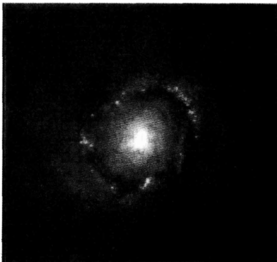


图 9－14　星暴星系 NGC 4314

是什么创造了有利星暴的条件？这是当前天文学研究的一个热门课题。有天文学家认为，当两个星系相互接近交会而过时，一个星系会从另一个星系拽取大量星际物质。这些新物质大部分充塞到星系的中心，其密度高于我们在银河系所见的典型分子云，导致效率极高的恒星形成——星暴（参看本节第四部分“星系的碰撞”）。

（二）射电星系

具有很强射电辐射的星系称为射电星系。它们在射电波段的辐射功率不仅比正常星系大得多，也比它们在光学波段的辐射功率大得多。这类星系大多是椭圆星系。主要类型有双源型和致密型两类。典型的双源型射电星系在星系中心附近有一个小射电源，而在星系本身之外很远有两个大射电源。这两个源，或称射电瓣，可能相距达 $10^5 \sim 10^7$ 秒差距，宽度达 $10^4 \sim 10^6$ 秒差距。有时可见多对瓣。这些源的结构显示它们指向星系的中心，实际上是从星系喷射的物质。每个射电瓣都是具有磁场的高能电子云，射电瓣在远离中央星系，它们的前端搜索广阔的星系空间，把巨量的星系物质压缩，产生剧烈碰撞，在前端形成热斑。X 射线探测卫星的观测表明，它们也是强 X 射线源。一个典型的射电瓣贮存的能量大约相当于银河系里的全部恒星在 1.0×10^8 年里辐射的能量。现在普遍认为，这么巨大的能量来源是由于在星系的中央潜藏着一个高速自转的超大质量黑洞，其质量至少达 $10^7 m_\odot$。黑洞以其巨大的引力吸引着四周的物质盘旋着向它掉落，在周围形成一个吸积盘。盘内的气体被压缩并加热，当温度超过 10^9 K 时，就会形成强烈的辐射场，导致高能等离子体喷流从核心以接近光速向垂直于盘的两极喷射而出。

天鹅 A 是这类射电星系的一个典型例子（见图 9 - 15）。它离银河系 2.25×10^8 秒差距，辐射功率比银河系强约 10^7 倍，是已知最强的河外射电源。它的两个射电瓣与光学星系相距约 50 千秒差距，三者排成一条直线，瓣的直径为 17 千秒差距。

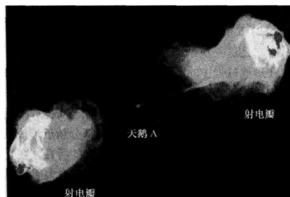


图 9 - 15　天鹅 A 的射电像

半人马 A 是距离最近的一个射电星系，距离为 3.50×10^6 秒差距，虽不如天鹅 A 威力强大，但在其他方面是相似的，例如都产生双极喷流，以接近光速的速度喷射到难以想象的远距离之外。图 9 - 16 是半人马 A 的射电像，显示了两端的喷流结构，其中心与一

个椭圆星系的中心重合，是已知的最小河外射电源，直径只有 0.027 光年，估计其中心的超大质量黑洞的质量为 $2\times10^8 m_\odot$。它也是一个 X 射线源。由于它的距离比较近，哈勃空间望远镜拍摄了它的光学对应体巨椭圆星系 NGC 5128，发现了在这个星系中间延伸着一条黑暗尘带和一个盘，它由发光的高速气体构成(见图 9-17)。这个尘带被认为是较小的旋涡星系的遗迹，它与这个巨椭圆星系碰撞后而被并合。

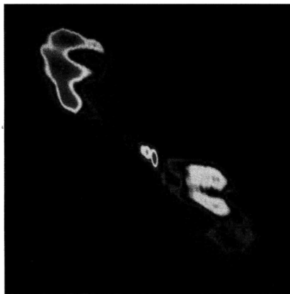
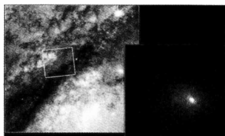


图 9-16　半人马 A 的射电像



(a) 深度黑暗的带被认为是较小的旋涡星系的遗迹，它与一个大的椭圆星系碰撞，并终于并合

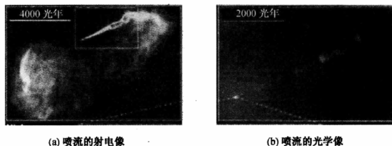


(b) 半人马 A 稠密的尘带中心。显示一个炽热气体的倾斜盘，长度超过 130 光年，集中的质量达 $2\times10^8 m_\odot$。右下角展示中心区域的放大像

图 9-17　巨椭圆星系 NGC 5128 及其尘带

致密型射电星系的射电辐射区通常是十分小的，不大于底片上星系光学像的范围。有的甚至不超过几个光年。

M87是位于室女星系团中心附近的巨椭圆星系，是射电源室女A的光学对应体，是致密型射电星系的一个典型。它的直径为5.0×10^5光年，距离地球6.50×10^7光年。它的核内和核外都有激烈活动。它的核内有一个射电致密源，直径不到0.25光年。它的外围有一个明显的狭长喷流[参看图9-9(a)和图9-18]，长达6.0×10^3光年，包含$10^6 m_\odot$的物质，光度达$10L_\odot$，速度接近光速。我们看到的光是电子围绕喷流内的磁感线高速运动时产生的。喷流也发出射电辐射。射电观测还发现一个弱的喷流结构，与上述亮喷流分居M 87的两侧。空间探测测定了M 87核心在不大于太阳系的体积内集中了$3.0\times10^9 m_\odot$的暗物质，可以推断这是一个超大质量黑洞。



(a) 喷流的射电像　　(b) 喷流的光学像

图9-18　巨椭圆星系M 87的喷流

(三) 塞佛特星系和蝎虎天体

塞佛特星系是美国天文学家塞佛特（C. K. Seyfert）于1943年发现的一类活动星系。它们是带有异常明亮的核的旋涡星系，星系核几乎占据了星系发出的全部光亮（见图9-19）。星系核内充满电离气体，其质量达$10\sim10^3\ m_\odot$，每立方厘米体积中有离子$10^7\sim10^9$个，气体做速度很大的随机运动，速度达10^3 km/s量级。这种速度可能是由于激烈的爆发引起。塞佛特星系有强于正常旋涡星系的射电辐射和红外辐射，有些塞佛特星系已探测到X射线辐射。

蝎虎天体的原型是蝎虎BL。当1929年它刚被发现时人们认为它是一颗变星（见图9-20）。现在已可确认它是一个河外天体。蝎虎天体是与蝎虎BL有同样特征的天体。它们的共同特征主要有：① 一般呈恒星状，看不到任何结构，但一部分有暗弱的包层；② 射电、红外和可见光波段上的亮度都有快速变化，时标为几天至几个月；③ 光谱中既无吸收线又无发射线，只有毫无特征的连续辐射谱；④ 许多是致密的射电源，核心有很强

的射电辐射。



图 9-19　塞佛特星系 NGC 4151

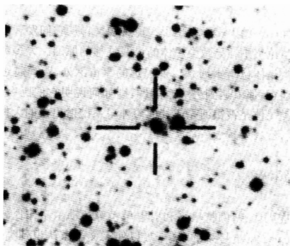


图 9-20　蝎虎 BL 的照片(图中央的天体是蝎虎 BL,它看起来几乎像恒星一样,其光度有变化,光谱是连续辐射谱)

三、类星体

（一）类星体的发现和认证

1960年天文学家们发现了射电源3C 48的光学对应体是一个视星等为16^m的恒星状天体，周围有很暗的星云状物质。令人不解的是光谱中有几条完全陌生的谱线。1962年，天文学家又发现了在射电源3C 273的位置上有一颗13^m的"恒星"。使天文学家同样困惑的是其光谱中的谱线也不寻常。1963年，终于有人认出了3C 273谱线的真面目，原来它们是氢原子的谱线，只不过经历了很大的红移，使得谱线不易认证。循着红移这条线索，再去分析3C 48的光谱，发现它的红移量更大。设想红移产生于多普勒效应，那么3C 273和3C 48都有很大的退行速度，分别达光速的1/6和1/3。对于这种在光学照片上的形态像恒星，但其本质又是迥然不同的天体，天文学家把它们命名为类星射电源。进一步的观测和研究揭示了又一类天体，它们的形态也很像恒星，而且也有很大的红移，但是没有射电辐射，被人们称之为射电宁静类星体。后来人们一律把两者全都称之为类星体（彩图28）。

类星体究竟是什么？给天文学家出了一道难题。自从它们发现以来的几十年中，争论尚未完全平息。争论集中在导致类星体的谱线红移的原因。大多数人主张"宇宙学红移"的观点，即认为类星体位于银河系以外遥远的宇宙深处，距离越远，红移就越大。如果类星体确实如此遥远，那就遇到另一个问题，即如何说明它们巨大的能量输出。另一种意见主要是认为类星体是被银河系或其他河外星系抛射出去的天体，在抛射中获得很大的速度，速度越大，红移就越大。

（二）类星体的本质

把类星体与蝎虎天体、塞佛特星系和射电星系等活动星系作比较，发现有许多相似的观测特征，特别是对于射电星系的了解，足以使天文学家认识到类星体是同一现象的不同表现。此外，从20世纪80年代以来，大量宇宙高能现象被观测和理解，类星体的能量问题也能合理地得到解释。

在认为红移是宇宙学红移的前提下，则红移从大到小意味着天体从年轻到年老。可以大致排出一个演化的序列：类星体、蝎虎天体、塞佛特星系、射电星系、终止于正常星系。由此看来，类星体是正常星系的幼年期。那么类星体就是极度活动的星系核。它们的周围就有星系盘。一般的类星体由于距离太远，星系盘显得很暗弱，角直径也太小，难

以观测到。事实上对于一些较近的类星体，例如 3C 273，已发现存在星系盘的证据。

至于类星体巨大能量的来源，现在认为在类星体的核心潜藏着超大质量黑洞，这是最流行的模型。迄今为止，对于多个星系中心附近运动的研究，已提示了存在超大质量黑洞。其中一些是活动星系核，而另一些则是正常的近距离星系。例如，我们银河系的中心包含有一个 $2.6\times10^{6}m_{\odot}$ 的黑洞。在银河系的近邻仙女星系，中心天体的质量达 $3\times10^{7}m_{\odot}$。在仔细研究过的活动星系 M 87[见图 9 - 9(a)]里，有迄今发现的质量最大的超大质量黑洞，质量达 $3\times10^{9}m_{\odot}$。研究表明，质量范围在 $10^{6}\sim10^{9}m_{\odot}$ 的黑洞在宇宙早期星系形成的过程中同时形成，并自然地位于星系中心。不难设想围绕着黑洞的气体终于形成了一个吸积盘。物质沿螺旋形轨迹掉向黑洞，并在接近过程中释放能量。能谱可以遍及射电波到 γ 射线谱线。

（三）受引力透镜作用的类星体像

爱因斯坦的广义相对论预言：物质或引力会使时空弯曲，光线在经过一个天体（称为居间天体）的引力场时，它的运动路径会发生偏折。居间天体的引力场就像光学中的透镜一样具有聚焦功能，这种现象称为引力透镜。当来自远方的星光在传输过程中经过大质量天体附近时，就会产生引力透镜效应。图 9 - 21 表示光线在一个质量很大的黑洞或星系附近的弯曲。

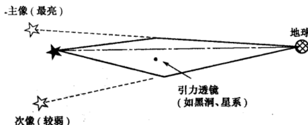


图 9 - 21　引力透镜现象

当天体、居间天体与观测者处于一条直线上时，由于星光在引力透镜附近弯曲，我们会观测到一圈由同一个星系构成的虚像。这些虚像形成的圈，称为爱因斯坦环（见图 9 - 22）。在爱因斯坦环的中心可能存在质量巨大的星系或星系团。

类星体很少成双成对，但有时也观测到例外的情形。类星体 0957＋561A 和 0957＋561B 在天空中相距仅 6″，且它们的谱线红移量都是相同的。实际上，它们是同一个类星体的两个光学像（见图 9 - 23）。假设在观测者和遥远的类星体之间有一个或多个天体正

好位于观测者视线的附近,居间天体引起的空间弯曲使得类星体发出的光线发生偏折,观测者便可接收到两束以上的光,从而视为两个以上的像。地面和空间观测还陆续发现了由引力透镜效应引起的"十"字形、弧形和环形的多重像。引力透镜现象不仅证明广义相对论的正确性,也反映出类星体的确是比普通星系更为遥远的天体,从而进一步支持了类星体是极其遥远的活动星系核的假说。通常引力透镜还会像光学透镜那样增强类星体像的亮度,这使得我们能够研究在正常情况下难以探测到的更遥远的类星体。还有,它提供了一个测量居间星系(即产生引力透镜效应的天体)质量的方法,我们从而知道在这个星系里相对于亮物质有多少暗物质(包括黑洞)存在。

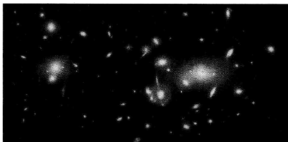


图 9-22 爱因斯坦环

注:在具有巨大质量的星系团 Abell 2218 上出现引力透镜效应。由于它的引力,处于背景远方星系团的星系光被扭曲,至少构成了 7 组以上的多个弧形,形成了爱因斯坦环。远方的星系团可以推定是在 100 亿光年左右的距离上。

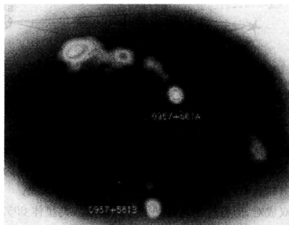


图 9-23 类星体 0957+561A 和 0957+561B(它们实际上是同一个类星体经过引力透镜作用后所成的像)

四、星系的碰撞

（一）星系碰撞的一般情形

天文学家发现，宇宙空间两个星系会通过引力相互吸引而碰撞，而且这是相当普遍的现象。尤其在宇宙早期，碰撞比今天要频繁得多。原因很简单，那时宇宙还没有膨胀到今天这么大，星系更紧密地靠在一起，发生碰撞的可能性自然就大得多。两个巨大的天体，每个都可能拥有成千上百亿颗恒星，以 1 000 km/s 左右的速度迎头相撞，这是多么波澜壮阔的事件。有些星系可能只是擦肩而过，而有的则是猛然的相向直撞。星系之间的碰撞过程要经历几亿年至几十亿年。更常见的情形是两个相互作用星系经受擦掠，而不是直接相撞。不论何种情况，当两个星系相当接近的时候，强大的潮汐力使星系扭曲，并拉拽出大量的物质。星系碰撞的时候，一般来说单个恒星不会碰撞，因为它们之间平均距离是几光年，是一般恒星大小的几百万倍。不过它们在星系内的分布和轨道会显著改变。可是，星系间的相互作用主要影响存在于星际介质中的自由气体；撞击产生强大的激波，能够驱动气体云，压缩它们，使得它们十分稠密，足以触发新恒星的形成。在有些场合，相互作用会产生壮丽的旋臂。在另一些场合，原来的两个旋涡星系并合后形成椭圆星系。现在已经清楚，这类碰撞在旋涡星系和椭圆星系的演化中起了决定性作用。星系晕包围着每个星系，星系晕里包含着大量的"暗物质"，决定碰撞后星系最终形状的关键因素是晕的质量。新形成的星系内的恒星和其他物质还要经过几亿年甚至几十亿年的漫长过程才能达到动力学平衡，最终成为单一的星系。

（二）几个实例

星系碰撞要经历极其漫长的时期，天文学家不可能观察到发生的整个过程，但是能够观测到两个星系相互作用过程的不同阶段。天文学家获取了关于星系间碰撞的许多清晰照片，展示了各种有趣的形态。两个（或多个）星系碰撞后所显示的多种多样形态揭示了许多性质，包括碰撞的各个阶段、星系的质量、它们的密度、它们的移动速度、撞击的角度，等等。下面介绍已经观测到并经过深入研究的几个实例。在前面 3 个例子中，可以见到正在碰撞或正在并合的两个星系，后两个例子展示并合后的结果。

图 9 - 24 展示位于大犬座的旋涡星系 NGC 2207 和 IC 2163，它们离地球约 1.14×10^8 光年，是一对相互作用的星系。NGC 2207 的尺度和质量都很大，它的潮汐力扭曲了 IC 2163 的形状。这里清晰可见星系相遇时的普遍特征，包括大量物质向外延伸、高强度

冲击下气体形成的羽片、星尘形成的条带和新恒星形成的风暴。NGC 2207 和 IC 2163 已永远锁定在一起，并将继续彼此损伤和破坏，直到几十亿年之后，它们终于并合形成一个单一的大质量星系。



图 9-24　NGC 2207 和 IC 2163 的相撞(相互作用的星系对 NGC 2207(左)和 IC 2163，在 NGC 2207 强大引力产生的潮汐作用下，IC 2163 的恒星已开始向右端冲去)

密近星系 NGC 4676，由于其特殊的外形又别称"老鼠星系"(见图 9-25)。它位于后发座，距离约 3×10^8 光年。这个星系实际上包含着两个正在并合的更小的星系，它们在双方引力的约束之下相互绕转，十分接近而产生显著的损伤和扭曲。由于这种破坏性的相遇，结果形成了由气体、尘埃和恒星构成的巨大的"桥"和"尾巴"，它们向太空延伸几百光年，还能见到几股物质流流到几百光年之外。哈勃空间望远镜拍摄了星系对的交会。这次并合经历了 1.60×10^8 年，碰撞过程催生了无数新的恒星和星团。几十亿年之后，两个星系将并合形成单一的巨椭圆星系。

还有一个著名的例子是触须星系(原 NGC 4038/4039)，它位于南天的乌鸦座，离地球约 6.3×10^7 光年。这对长长的、明亮的"触须"因两个星系之间的引潮力而形成。其核心区域可见两个"斑点"，它们是两个原星系的核心，一条宽宽的尘埃带延伸在这两个核心之间。尘埃带上有 1 000 多个明亮而年轻的星团，这种图像是迎头碰撞造成的(彩图 29)。

图 9-26 展示昌德拉卫星拍摄的 NGC 6240 的 X 射线像。据信这是两个较小的星系在大约 3×10^7 年前碰撞的产物。它是一个星暴星系，由于并合产生的扰动使得恒星的形成、演化和爆发以超常的高速率进行。这张 X 射线像显示并合活动产生的热量把气体

的温度提升到几百万度。图示核心内包含两个活动的超大质量黑洞(右下角的方框内)，明亮的 X 射线正是从环绕在它们周围的超高温吸积盘里发出的。



图 9-25　老鼠星系

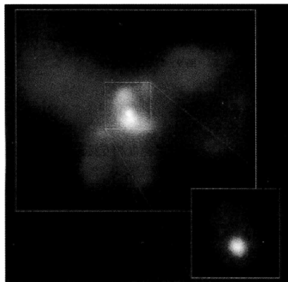


图 9-26　星系 NGC 6240 的 X 射线像

图 9-27 是草帽星系(M 104)的像。它是旋涡星系，这里几乎是从它的边缘看去，拦腰一条浓密的尘埃带是它显著的特征。它位于室女座，距离地球约 5.0×10^{7} 光年。它包含大的明亮核心，又有十分明确的旋臂，也有非常突出的核球，并有分布很广、成员众多

的星团系统。据推测，早年它曾与一个较小的旋涡星系碰撞而并合，由此留下了暗黑的尘带。



图 9-27 草帽星系

（三）银河系与仙女星系的碰撞

银河系与仙女星系正在以 133 km/s 的速度相互接近。约 40 亿年后，银河系与仙女星系将发生碰撞，并最终并合。仙女星系的距离是 220 万光年，是银河系最邻近的大星系。当前，仙女星系看来只是在北半球秋夜星空中纺锤形的一个光斑（参看图 9-7）。它们将会迎头相撞呢，还是擦边相碰，这取决于仙女星系在天空的切向运动。

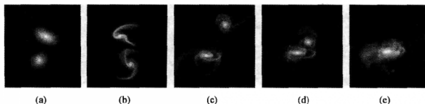
在两星系交会的时期里，大团尺度达几百光年的冷分子气体，将受到压缩并爆发新的光芒。两个星系美丽的旋涡图案，在它们相互的引力影响下解体，形成了延展深广的新旋臂，把恒星和气体抛入星系际介质之中，只保留星系核。随着每一阶段的变化，发生了恒星形成的更壮观的热潮，这时一连串超新星爆发将把遗迹中留存的大量气体和尘埃驱除出去。设想在某个遥远星系内的观测者，将看到银河系与仙女星系十分类似于我们现在看到的 NGC 2207 与 IC 2163（参看图 9-24）。最后，在这次灾变的 10 至 20 亿年后，来自这两个星系的恒星将混和起来，形成单一的椭圆星系，它包含着原来相邻的星系内经历灾难和变迁而幸存的老年恒星。在这个新星系的核心将会产生一个质量高达 1 ×

$10^8 m_\odot$ 的超大质量黑洞，并形成光辉灿烂的类星体。

就我们的太阳系而言，有两种可能的命运，取决于在碰撞发生之际，它在环绕银河系旋转轨道上的位置。第一种情况，太阳可能陷入潮汐尾巴，与其他数百万颗恒星一起，沉沦进星系际空间的无边黑暗中去，太阳系将处于十分孤立的境地，周围没有几颗恒星为伴，因而夜空将十分黑暗。第二种情况是，太阳受并合引起的流动裹挟而进入内部，在那里爆发了新恒星形成的高潮，而且超新星的爆发率很高，所以夜空非常明亮。

（四）星系碰撞过程的计算机模拟

天文学家用计算机模拟了星系碰撞的过程。图 9－28 展示两个旋涡星系碰撞的计算机模拟像。每个星系设想为具有 4×10^7 颗恒星，包围着由 1×10^7 颗粒子构成的暗物质晕。每张像代表的空间大小近似为 5.0×10^5 光年。在 9－28(a)中，两个星系正在它们相互引力的作用下加速靠近，开始跳起“双人舞”。在它们碰撞之前，它们的形态不会有显著改变。图 9－28(b)中显示经过了 2.7×10^8 年，两个星系并不迎头相撞，而是相互旋转着经过，它们的引力作用激发几条旋臂张开，旋涡盘将在引力作用下解体，潮汐力产生了长长的羽状物，类似于触须星系所见的尾巴，并在支离破碎的气体和尘埃的条带内产生明亮的新恒星和星团。在图 9－28(c)中，已经过了大约 7.2×10^8 年，星系在第二次交会中再次回落到一起，并进一步分崩离析，导致中心区域的物质迅速并合。图 9－28(d)中，已经过了大约 1.0×10^9 年，两个星系经受着一系列的灾变，导致它们的旋涡图像继续瓦解。每个星系各有一部分通过扩展的潮汐尾巴而被扫入星系际空间。最后，在图 9－28(e)中，展示它们开始“双人舞”之后的 1.2×10^9 年，中心区域将并合成单一的恒星聚集体。作为灾变的后果，看来出现了比原来质量更大的黑洞，它风卷残云般地吞噬剧烈涡动的气体，将点火形成类星体。



(a)　(b)　(c)　(d)　(e)

图 9－28　两个星系碰撞的计算机模拟

第三节　星系团和超星系团

一、星系的分布

星系在空间的分布并不均匀，有成群结队、聚集成团的特征。十几个甚至成百上千个相互之间有物理联系的星系组成的星系集团称为星系团。孤立的星系只占少数，大多数星系都从属于某个星系团，星系团有的很大，有的很小，小的则只有两个星系，称为双重星系。十几个到几十个星系组成的较小的星系团称为星系群。银河系所处的星系群称为本星系群。形态规则的星系团具有近似球对称的外形和星系高度密集的中心区，基本上由椭圆星系和透镜状星系组成。不规则星系团结构松散，是各种类型星系的混合体，大小也相差很大。

研究星系团的意义是显著的。首先，能为我们提供星系形成的线索。是首先形成星系团大小的天体，然后瓦解成为星系大小的天体，还是星系形成在先，然后它们聚集成为星系团。其次，星系团也呈现了一些动力学问题，这包括包含在它们内部的暗物质问题。最后，探索星系团这样大的尺度，涉及宇宙的总体结构。

图 9－29 以二维图像展示了星系的分布。本图覆盖了南银极附近 100°×50°的天区，约占全天的 1/10，其结果来自于星系的巡天观测。在这些图像中间，我们清楚地看到了成团现象，即所形成的星系团。

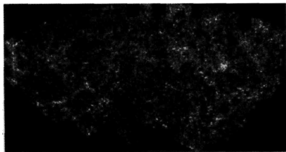


图 9－29　星系的分布

二、本星系群

银河系所在的星系团称为本星系群。本星系群由银河系和其附近的仙女星系、大麦

哲伦云、小麦哲伦云、三角星系等40多个星系组成。

银河系和仙女星系是本星系群中质量最大的两个星系，它们影响本星系群中其他星系的运动，维系着本星系群。银河系和仙女星系在互相绕对方旋转，并在互相接近，如上所述，估计在4.0×10^9年以后将会发生碰撞，最终并合成一个星系。

（一）仙女星系

仙女星系（参见图9-7）又称为M 31或NGC 224，它的星等为3.6^m，位于仙女座ν附近。在晴朗的夜晚能用肉眼看到，看上去如一个梭形的模糊光斑，是地球上人类能用肉眼见到的宇宙中最远的天体。M 31属Sb型，是离银河系最近的旋涡星系，距离为2.2×10^6光年。它的可测部分的线直径约为1.6×10^5光年，质量约为$4\times10^{11}\ m_\odot$。如果将星系晕计入，M 31的总质量可能达到$5\times10^{12}\ m_\odot$。无论以大小还是以质量而言，M 31都位于本星系群各个成员之首。

M 31的形状和结构与银河系相似。M 31中央1千秒差距之内是明亮的核球，其中心是星系核，这是长轴和短轴分别为8秒差距和5秒差距的一个椭球，显得十分明亮。已经测定其中心有一个$3\times10^7m_\odot$的超大质量黑洞。核球周围是扁盘和旋臂，扁盘与我们从地球上看去的视线的交角约13°，成几乎侧视的态势，所以旋臂不易看清楚。

在M 31内人们已发现了数百个球状星团、疏散星团、OB星协以及各种星云和变星。M 31中尘埃很丰富，形成许多尘埃云，也探测到许多射电源和X射线源。

（二）M 33星系

M 33又称NGC 598，位于三角座，是一个旋臂很展开的Sc星系（彩图30）。M 33的距离为840千秒差距，直径为12千秒差距，质量为$1.5\times10^{10}\ m_\odot$。在本星系群中，按大小和质量它名列第三。M 33中星族Ⅰ的特征特别明显，在旋臂内有一个巨大的HⅡ区，直径达200多秒差距。在M 33的外围，人们观测到一个很大的弥漫星云，被称为NGC 604，在其中心观测到一个很强的X射线源。

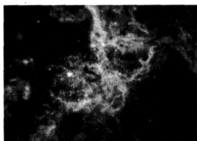
（三）大小麦哲伦云

1519—1521年，葡萄牙航海家麦哲伦率船队进行人类首次环球航行期间，在南美洲南端看到天顶附近有两个很大的星云。后人按视大小分别称其为大麦哲伦云和小麦哲伦云，简称大麦云、小麦云（参见图9-13）。大麦云位于剑鱼座与山案座交界处，小麦云

在杜鹃座内。它们离南天极约 20°，因此在北纬 20°以北的地方，这两个星云是永不升起的。

大麦云离我们 1.79×10^5 光年，质量约 $1\times10^{10}m_{\odot}$，小麦云离我们 1.89×10^5 光年，质量约 $2\times10^9m_{\odot}$，两者分别只有银河系质量的 1/60 和 1/300。它们都是不规则星系。大、小麦云紧挨着银河系，与银河系相比又都很小，可以看成是银河系的伴星系，或者说三者形成了三重星系。它们在银河系的引力作用下扭曲。射电观测表明，大、小麦云含有大量的星际气体。尤其是小麦云，它们是形成恒星的丰富原料，这两个星系有一个很大的共同的气体包层，并有 HI 气体从它们中流出，伸向银河系，向银河系输送物质，形成了连接大、小麦云与银河系的"气体桥"。显然，这些物质是在银河系的潮汐作用下从大、小麦云里拉出来的。同时在银河系的银盘外部也有 HI 气体层向两旁弯曲地延伸，这正是大、小麦云潮汐力作用的结果。

在大麦云里有一个引人注目的天体，它是发射星云剑鱼 30。由于形如南欧的一种蜘蛛"塔兰图拉"，故又名为蜘蛛星云(见图 9-30)。它是迄今观测到的最大的发射星云，被一群 O 型和 B 型照射而发光，估计直径约 500 秒差距，质量达 $5\times10^6m_{\odot}$，比猎户星云大得多。在这个星云里有一个由许多年老恒星构成的星团，那里经常有超新星爆发，发出强烈的辐射。



(a) 剑鱼 30 星云



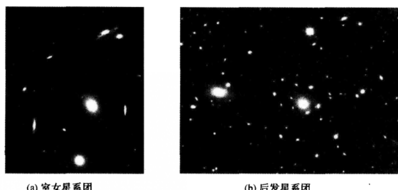
(b) 星云的局部放大像，右下方为星云内的亮星团 Hodge301，包含许多年老恒星，并经常爆发超新星

图 9-30 发射星云剑鱼 30

三、星系团

星系团与星系群没有实质性的区别，两者的划分只是根据成员星的多寡，其界限按约定俗成的习惯而定。通常把星系数在几十个以下的称为星系群，而星系团的成员最多

可达几千个，而且成员数目在 1 000 个以上的往往又称其为富星系团，1 000 个以下的则称贫星系团。附近的星系团以它们的星座命名。图 9－31 给出 2 个邻近星系团的例子。



(a) 室女星系团　　(b) 后发星系团

图 9－31　星系团

（一）室女星系团

室女星系团是离银河系最近的一个星系团，距离约为 17～22 百万秒差距，其角直径约 12°。它的成员星系估计超过 500 个。这是一个典型的不规则星系团，成员中旋涡星系占 2/3 以上。巨椭圆星系 M 87 位于离这个星系团中心约 1°的地方，如前所述，它是一个著名的活动星系。

（二）后发星系团

后发星系团离银河系的距离约 95 百万秒差距，其角直径约 4°。整个星系团的成员星系可能达 1 万个。这是一个典型的规则星系团，成员星系的分布类似球状星团里恒星的分布，呈球对称性。在中心附近有两个超巨星系：椭圆星系 NGC 4889 和透镜状星系 NGC 4874。

（三）半人马星系团

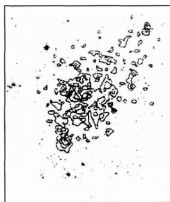
这是南天最显著的富星系团，距离约 75 百万秒差距。它有两个星系聚集区，属不规则星系团。

四、星系际物质

星系际物质是泛指存在于星系团内星系际空间内的物质，又是指星系团与星系团之间空间内的物质。它们很可能与银河系内的星际物质类似，包括气体和尘埃。气体以氢为主，处于中性或电离状态。

对星系际气体的探测表明，中性氢原子的密度十分稀薄，每立方厘米体积中有氢分子不多于 10^{-15}个。估计在星系际最可能存在的物质是电离氢。因为氢原子一旦电离，由于密度极低，遭遇电子复合成原子的概率极小，因此电离氢得以大量存在。它们能够以等离子体的状态存在，温度达 $10^7 \sim 10^8$K，每立方厘米体积中有离子 10^{-3}个，并发射 X 射线。20 世纪 70 年代 X 射线探测卫星升空后，成功地开展了对它们的探测。

“爱因斯坦 X 射线天文台”装备有分辨率极高的 X 射线望远镜，它进一步揭示了电离气体在星系团内的分布方式。在一种极端的情况下，气体成群地集结在单个星系或多个星系的周围，总体上呈无规则分布[见图 9－32(a)]。在另一极端情况，气体分布的密度在星系团中心最高，向外平滑地下降[见图 9－32(b)]。气体分布方式的不同反映了星系团不同的演化状态。在前一种情况，气体停留在其母星系周围，主要受母星系引力场的作用，因此这种星系团是较年轻的。在后一种情况，气体与星系的相互作用已经历了漫长的时间，在整个星系团引力场的控制下引起了气体向中心聚集的平滑分布，因此这种星系团已相当年老。介于两种极端情况之间的分布也已经观测到。星系际气体的探测为人们研究星系团的演化提供了观测证据。



(a) 星系团 A 1367 内气体集结在单个星系或多个星系周围



(b) 星系团 A 85 中气体呈较平滑的分布

图 9－32　气体在星系团内的两种极端分布方式

五、星系团里的暗物质

天文学家观测星系团内各成员星系的光谱，测量谱线位移，通过多普勒定律，确定它们的视向速度。进而，借助物理学上的动力学定律计算整个星系团的质量。这样计算得到的质量称为引力质量。一方面，它产生引力，把各成员星系相互吸引在一起，克服因各成员星系运动而产生的离心力，使整个系统保持束缚状态，维持星系团的稳定。另一方面，把一个个可见成员星系的质量累加起来，也能获得星系团的总质量。实测表明，星系团(包括本星系群)的引力质量比可见物质的质量大得多。这与星系的情况完全相似，同样说明星系团里应包含大量未被发现的暗物质，其质量占星系团总质量的绝大部分。例如，室女星系团里暗物质估计占98%。这些暗物质究竟是什么？星系际气体以及低光度天体和黑洞等均远不足以说明这么大的差距。现在比较普遍的看法是，它们是中微子和弱相互作用大质量粒子等。

粒子物质可粗分为两类。一类粒子的静质量很小，在宇宙的退耦时期，这类粒子的热运动速度仍很接近光速，因而称热暗物质粒子。今天的宇宙背景中，热暗物质的粒子数密度与光子相当，即每立方厘米体积中有100个粒子。如果它的静质量为电子质量的2×10^{-5}的量级，它就一定是“平直”宇宙的主要组分之一。另一类粒子的静质量很大，退耦时它们的热速度已远低于光速，所以叫冷暗物质粒子。冷暗物质粒子在退耦前已开始大量地成对湮灭，退耦后遗留下来粒子数密度显著地少于光子。如果某种稳定冷暗物质粒子具有电子质量的2×10^{4}量级的静质量，它就会是今天宇宙密度的主要贡献者之一。

六、超星系团和宇宙的大尺度结构

(一) *超星系团*

既然星系能聚集成为星系团，那么星系团是否会聚集成更大的集群？答案是肯定的。它们称为超星系团。若干星系团组成更高层次的超星系团，它们通常具有扁形结构，中间是星系密度较低的称为“巨洞”的巨大空穴，四周是分布在二维面上的星系高密度区。超星系团各成员星系团之间的引力作用比星系团内各成员星系之间的要弱得多。

20世纪50年代天文学家认证出的第一个超星系团就是银河系所在的这个星系团，称为本超星系团。它是由本星系群、室女星系团以及一些较小的星系群和星系团组成，形成一个扁平状的集团。室女星系团靠近本超星系团的中心，本星系群靠近边缘。本超星系团包含10^{6}个星系，长径为30百万秒差距，厚为1.8百万秒差距，其体积约为10^{22}立

方秒差距。通过对更多的星系团的分布的探索，还发现了若干较近的超星系团，按所在方向的星座命名，有武仙超星系团、北冕超星系团、巨蛇-室女超星系团等。

（二）星系的三维巡天观测

从单个星系、双重星系、多重星系到星系群、星系团、超星系团构成了一幅阶梯式结构的图像。从目前的观测水平来说，没有证据表明超星系团集结成更大的系统。由此可见，探明星系团和超星系团的空间分布，即可了解宇宙的大尺度结构。这个问题的研究有助于我们明了宇宙的当前状态和探讨演化过程。为此，我们首先要巡查星系的三维分布。这些研究中的一个主要突破来自于能够在射电和光学波段实现红移巡天观测。在较短的时间内测量大量红移。由于星系内都存在大面积的 HI 区，所以射电测量是在21 cm波长上，光学观测是对氢谱线进行测量。测定了星系的红移后，就可以应用哈勃定律把它们转换为距离。加上星系的另外两个坐标赤经和赤纬，就可以画出星系的三维分布。通常的做法是应用相应的数据画出不同的截面图，然后在每一个截面上作星系分布的二维图像。对三维空间作截面以产生一系列二维图像，把这些图像集合起来，就给我们以三维结构的感觉。我们能够按天球坐标（例如赤纬）的一定间距，对另一个天球坐标（例如赤经）和红移作截面来展示星系的三维分布。

图 9 - 33 展示 3 个代表性的巡天结果。3 幅图按扇形展开，中心是我们所在的银河系，外围标注赤经（以小时为单位），旁侧标注距离（以百万秒差距为单位）。图 9 - 33(a)图的赤纬间距是 6°(26.5°≤δ<32.5°)；图 9 - 33(b)的赤纬间距是 12°(24°.0≤δ<36°.0)；图 9 - 33(c)图的赤纬间距是 12°(36°.0≤δ<48°.0)。图 9 - 33(a)(b)在赤纬上有 8.5°的重叠，而图 9 - 33(c)(b)在赤纬上是衔接的。图中，一个黑点代表一个星系；黑点密集的地方是星系团；星系团密集的地方是超星系团。

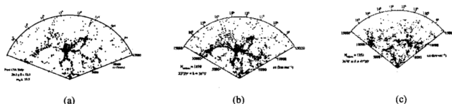


图 9 - 33 红移巡天结果

（三）宇宙的大尺度结构

上述巡天结果显示，星系团和超星系团的分布是不均匀地形成带状的纤维结构。我们也可以从图中看到没有黑点的空穴，即“巨洞”。巨洞的典型大小是几十到上百的百万秒差距。超星系团和巨洞表明宇宙的结构相当复杂，类似于海绵或瑞士奶酪。

天文学家从星系的红移测量还发现了一个宇宙“长城”的结构。在与后发星系团距离差不多的几千个星系紧密地聚集在一个长约 170 百万秒差距，宽约 60 百万秒差距，厚约 5 百万秒差距的巨大结构内，其中的星系密度比周围约高 5 倍。

巨洞、长城和纤维结构表明，在星系团和超星系团的尺度上，宇宙在总体上呈蜂窝结构（见图 9－34）。不过，如果我们把考察的眼光更加扩大，那么就更大的范围而言，宇宙中物质的分布大体上是均匀的。

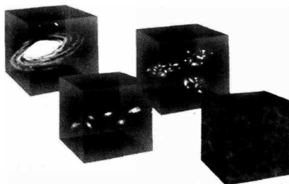


图 9－34　从星系到宇宙的大尺度结构

第十章　宇　宙　学

第一节　概　　述

一、宇宙学的研究对象

宇宙学是把宇宙作为一个整体，研究其起源、结构、运动和演化的学科。它是当今天文学研究的前沿领域之一。

在宇宙学家的眼里，宇宙就像一只充满气体的容器。气体的分子是星系。在这么宏大的图景里，星系里的结构和成分已无关紧要。当然，星云、星团、恒星、行星等次级天体还蕴含着一些隐蔽的线索供我们了解更大的结构，但是它们不会影响更大结构本身。这正如在热力学里，物理学家研究气体的时候把它看做是分子的集合体，而不再在意分子是由原子构成的，原子是由质子、中子和电子构成的，等等。他们所关心的只是分子如何相互作用，并如何影响气体的宏观性质。

宇宙可以看做大尺度的流体。长时期里，人们只认识到正在影响大尺度结构的唯一的力是引力，要求应用广义相对论所描述的引力理论。有时，电磁力也很重要，但是它不影响大尺度结构。但是，在宇宙诞生的早期，曾经产生了温度和密度极高的极端状态，发生了一些非常态的物理现象。那时的物理状态，要求人们用当前正在努力创建的关于自然界作用力的大统一理论和引力的量子理论去解释。因此，涉及宇宙中最大尺度和最小尺度的两门学科——宇宙学和基本粒子物理学在这个领域里奇妙地结合起来了。正是宇宙学的发展为检验现代物理学的一些新理论提供了唯一的机会。好比有物理学家在137 亿年前做了一次实验，结果留存给我们去观测和阐释。

正如天文学的其他领域一样，宇宙学的研究必须以观测事实为基础。随着空间探测的深入和地基大型设备的建立，观测宇宙学的领域正在不断开拓，近来的探测成果，已极大地扩充了人们的知识，有力地支撑了理论的发展。

二、宇宙观念的演变

人类宇宙观念的演变主要经历了五个阶段：神话传说、古代的朴素宇宙观、地心说、日心说和现代宇宙学说。

人类在远古时代最初的宇宙观念具有一定的特征，即把直观看到的自然景象，认为就是真实的宇宙结构，还掺杂着离奇的神话。而且越往远古，神话的成分越加浓烈。世界四大文明古国早期留传至今的神话传说都鲜明地反映了这一特征。例如，远古的埃及人有一个关于宇宙生成的神话：天神努特(Nut)和地神盖伯(Geb)原先都共处于原始的水中，后来在原始的水中又出现了一个空气和阳光之神旭(Shu)，他用两手将天神的中部高高举起，天神张开了两手和两脚支撑自己，最后成为布满星星的穹窿状的天。在天神的身上有一条河，太阳神每天操舟从东把太阳向西运送一趟，如图 10－1 所示。



图 10－1 远古埃及人的宇宙观念

人类历史发展到公元前 6 世纪，无论东方（以中国文明为代表）和西方（以古希腊文明为代表）文化的发展都进入了一个空前繁荣的时期，人类文明进入了开始理性思考的时代。人类对宇宙的认识进入了朴素宇宙观的阶段。中国战国时期的早期盖天说认为，天圆如张盖，地方如棋局，早期的古希腊学者也有类似的看法。例如，公元前 6 世纪的希腊学者泰勒斯(Thales)所构想的宇宙就是圆球形的天穹覆盖着平坦的大地。盖天说这种朴素的宇宙观，虽然已摆脱了神话的影响，但是远没有透过表象达到事物的本质（见图

10-2)。



(a) 中国古代的盖天说



(b) 古希腊学者泰勒斯的宇宙观

图 10-2　天穹覆盖大地的宇宙构想

古希腊学者构筑的地心说堪称人类文明史上第一个完美的宇宙图像。他们认为地球居于宇宙中心，其外包围着日、月和当时肉眼可见的5大行星的圈层，而且它们都在各自的轨道上运行，最外层是所谓的“恒星天”和“最高天”。最初提出这一图像的是古希腊著名学者柏拉图。公元2世纪，客居于亚历山大里亚的古希腊学者托勒玫总结了古希腊几百年的天文学成就，结合自己几十年观测成果，集先后之大成，提出了地球居中，其外依次排列月球、水星、金星、太阳、火星、木星、土星和“恒星天”的完整的地心学说(参见绪论图2)。这一学说是人类理性思维的光辉成就，成为人类认识宇宙历史上第一个重要里程碑，为后代建立正确的宇宙观开辟了道路。中国战国时期的浑天说认为，浑天如鸡子，天体圆如弹丸，地如鸡子中黄，孤居于内(见图10-3)。但是，中国古人还没有明确建立地球是球形的观念。



图 10-3　中国古代的浑天说

公元 5 世纪以后，欧洲进入了中世纪，前后经历 1 000 年，期间政治、经济、文化、科技几乎停滞不前。到了 15 世纪，欧洲社会的资本主义显露曙光，尤其是地理大发现推动了天文学的发展。这时，地心说不仅为基督教会所利用成为禁锢人们思想的工具，而且也阻碍了天文学沿正确方向前进。1543 年，伟大的波兰天文学家哥白尼发表了《天体运行论》，提出了日心说。日心说认为，太阳是宇宙的中心，行星皆绕日运行，最外层的恒星天球则与地心说的并无本质差异。日心说把太阳移到了托勒玫体系的中心，置换了地球的位置，而地球“降格”为一颗普通的行星（参见绪论图 3）。这不仅是人类建立正确宇宙观念的又一个重要里程碑，也是人类正确认识自然界的一次飞跃。从此，天文学乃至整个自然科学迈向了发展的康庄大道。

人类历史进入 20 世纪，伴随着资本主义生产力和科学技术的高度发展，人类的眼界早已突破了狭小的太阳系乃至银河系，投向浩瀚的宇宙空间，现代宇宙学说应运而生。在各种现代宇宙学说中，居于主流地位的是大爆炸宇宙论，认为宇宙起源于一次大爆炸，且随着时间不断膨胀。这将在下文中我们重点介绍。

三、牛顿的宇宙观和奥伯斯佯谬

（一）牛顿的宇宙观

牛顿是最早用科学方法研究宇宙学问题的科学家之一。17 世纪晚期，他发表了万有引力理论。在此基础上他对宇宙结构进行了深入思考。他认为如果宇宙是有限的，就有边界和中心。散布于宇宙内的物质，由于万有引力互相吸引，最终必然落向中心，在那里形成一个巨大的物质球，这既与当前的观测事实不符，又预示了宇宙的最终结局，也与人们的愿望相悖。于是牛顿设想了一个既无边界又无中心的无限宇宙，不存在某一特殊的方向使所有物质沿该方向运动并聚集在一起。总体上说，每一团物质受到各方向的引力作用，这些作用彼此平衡，使该物质停留原地。但是，这不排除宇宙内物质局部集中的现象，那里较强的引力吸引物质局部地各自聚集成团，彼此相隔很大的距离，散布在无限的空间内。牛顿的这个无限宇宙模型在总体上是稳定的，而在有限的局部区域内是不稳定的，形成了无数大大小小的天体。

（二）奥伯斯佯谬

有一项简单的观测，我们人人可以去做，它虽简单却意味深长，因为它蕴藏着关于宇宙结构的深刻意义。这项观测就是抬头观望漆黑一片的夜晚天空。1823 年德国业余天

文学家奥伯斯（H. W. M. Olbers）提出了一个发人深思的问题，如果宇宙是无限的，并且均匀地分布着无数类似于太阳的恒星，则无论向哪个方向看去，每条视线最终应该终结在一颗恒星的表面。于是天空每单位面积的亮度与太阳表面单位面积的亮度差不多，夜晚的天空看来应该与白天一样明亮。这在逻辑上完全是站得住脚的，但显然与事实相矛盾，因而被称为奥伯斯佯谬（或称奥伯斯悖论）。

历史上，不断地有人试图从不同角度去解脱这个佯谬。有人认为，恒星的亮度与距离平方成反比，恒星比太阳遥远得多，因而显得很暗。但是，殊不知在宇宙无限的前提下，宇宙中的恒星个数无限，它们数量的面密度则与距离平方成正比，这样天空每单位面积的亮度应保持常数，仍与白天的亮度相当。参看图 10－4，考虑一个半径为 r、厚度为 dr 的球壳对夜空的贡献。为简化起见，假设恒星均匀分布，在每单位体积中有 n 颗恒星，那么每一球壳中的恒星数是 $N = 4\pi r^2 n dr$。每个球壳中的恒星数随 r^2 而增大。然而，我们看到的每颗恒星的亮度则随 $1/r^2$ 而下降。因此，r^2 与 $1/r^2$ 将抵消，每个球壳的亮度是相同的。如果有无数个球壳，在每一个球壳的贡献都累积起来之后，天空将显得无限的亮。还有人认为，我们所看见的恒星在银河系内，银河系不会无限延伸开去。大多数视线在击中恒星之前将会离开银河系。可惜，如果以星系取代前面提出的这个问题中的恒星，问题依然存在。又有人认为，由于在星际（或星系际）存在尘埃，远方的星光被星际尘埃吸收了，因而天空变暗。其实不然，因为尘埃吸收了大量星光，被加热后也会发光，天空照样十分明亮。

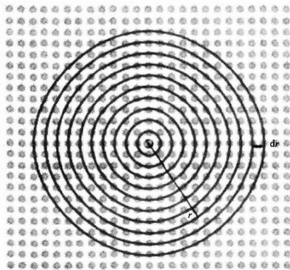
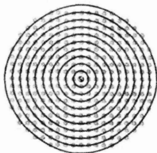
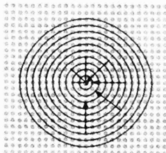


图 10－4　在无限大的宇宙内有无限多个亮度相同的球壳

事实上，奥伯斯佯谬是向牛顿无限宇宙模型提出的挑战。如果认为宇宙的大小是有限的，那么宇宙内的恒星（或星系）的数量就有限，佯谬反映的似是而非的问题就迎刃而解了[见图 10－5(a)]。或者认为恒星（或星系）分布的空间无限（这相当于认为在我们所在的宇宙之外还有无限多个类似的“宇宙”），而宇宙的年龄又是有限（设为 t_0），那么我们只能接收到有限距离 ct_0（c 为光速）之内的星光。其效果与宇宙的大小有限是一样的[见图 10－5(b)]。



(a) 宇宙的大小有限



(b) 宇宙的年龄有限（箭头由短到长表示宇宙在膨胀）

图 10－5 奥伯斯佯谬在宇宙的大小或年龄有限的情况下被破解

四、宇宙的膨胀

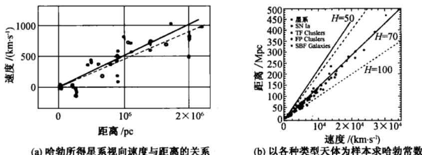
（一）哈勃定律的发现

20 世纪 10 至 20 年代，美国天文学家哈勃等人致力于旋涡星云视向速度的测量。特别是哈勃，他不仅投身于这项工作，还采用各种方法测量和估计它们的距离。1929 年，哈勃根据这些测量，分析了 24 个星系的视向速度和距离的资料，发现距离越大的河外星系，红移量就越大，即视向速度就越大。他求得了如图 10－6 (a) 所示的线性关系，即河外星系的视向速度与它们的距离成正比，这个关系称为哈勃定律。哈勃定律用公式表示如下：

$$V = H_0 D \tag{10-1}$$

式中：V 为河外星系的视向速度，以 km/s 为单位；D 为其距离，以 Mpc 为单位；H_0 是比例常数，称为哈勃常数，以 km/(s·Mpc)为单位。H 的下标零表示这是当前值（见图 10－

6)。下文我们将会看到,说 H 是常数,只是表明它在每一确定时期内在空间上是不变的,但是会随时间而改变。



(a) 哈勃所得星系视向速度与距离的关系 (b) 以各种类型天体为样本求哈勃常数

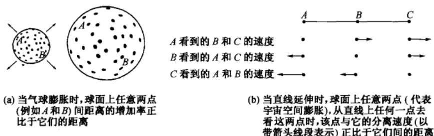
图 10-6 哈勃定律和哈勃常数

测定哈勃常数的关键在于测定河外星系的距离。由于星系极其遥远,这些天体内的距离指示的天体(例如造父变星)很暗,难以分辨,因此星系距离的测定带有很大的误差,导致确定哈勃常数十分困难。近年来人们采用各种不同类型天体为样本,测量它们的距离和红移,求出哈勃常数,取其采用值为 $H=(71\pm7)$ km/(s · Mpc)[见图 10-6(b)]。

(二) 哈勃定律的意义

初看起来,哈勃定律似乎显示了一种异乎寻常的现象,即我们处于宇宙的某个特殊位置,其他星系都在离我们四散而去。实际上,哈勃定律可以理解为所有的星系都在彼此远离,这种运动代表了宇宙的整体膨胀。为了阐明这一点,让我们设想星系是涂在气球表面的一个点,如图 10-7(a)所示。当气球被吹胀时,所有的点都远离其他每一点。再看图 10-7(b),设 $AC=2AB$,B 和 C 随着气球的胀大而远离 A 点,BA 和 CA 在单位时间内增加的距离(即速度,如图中第二行小箭头所示)与原距离 AB 和 AC 成正比,这就反映了哈勃定律,而且不论从哪一点去观测,情况都一样。

假设膨胀速率从宇宙诞生(设 $t=0$)以来保持不变,若当时所有天体都紧挨在一起,那么任何两个天体之间当前的距离是 $d=vt_0$(t_0 是宇宙当前的年龄)。解得 $v=(1/t_0)d$。与式(10-1)比较,得 $H_0=1/t_0$,即 $t_0=1/H_0$。我们把 $1/H_0$ 称为哈勃时间,它是宇宙膨胀恒速情况下的宇宙年龄。事实上,膨胀并非恒速。如果膨胀在逐渐慢下来,宇宙的实际年龄就小于哈勃时间。如果膨胀在逐渐加速,宇宙的实际年龄就大于哈勃时间。正由于宇宙的膨胀速率在宇宙演化过程中是变化的,因此哈勃常数在时间进程中并不保持恒定。



(a) 当气球膨胀时，球面上任意两点(例如 A 和 B) 间距离的增加率正比于它们的距离

(b) 当直线延伸时，球面上任意两点（代表宇宙空间膨胀），从直线上任何一点去看这两点时，该点与它的分离速度(以带箭头线段表示) 正比于它们间的距离

图 10－7　宇宙膨胀的类比

哈勃定律在测定遥远天体的距离上有巨大价值。它只适用于非常遥远的天体，它们相对于我们的速度主要取决于宇宙膨胀。任何两个星系之间的相对速度包括两部分：一是由于宇宙膨胀引起的距离随时间的变化，二是它们本身在宇宙空间的运动。在两个星系相距遥远的情况下，前者远大于后者。我们称对于银河系而言属于这种情况的星系是在哈勃流中。显然，本星系群里的星系不在哈勃流中，因宇宙膨胀引起的分离速度太小，星系间的距离太近。它们中有的谱线呈蓝移，表明正在与银河系相互靠近，而这正是两个星系本身运动的结果。

在天文学上更普遍地采用谱线波长的相对变化 $Z=\frac{\lambda-\lambda_0}{\lambda_0}$ 来表示红移的大小。在红移是由多普勒效应产生的前提下，按照式(7－9)，得

$$Z=\frac{v_r}{c} \tag{10-2}$$

这个公式只适用于 Z 比 1 小得多(即 $v_r \ll c$)的情况。在速度很大的情况下，基于经典物理学的式(7－9)已不适用，必须考虑相对论效应，这时要用下列公式

$$Z=\sqrt{\frac{c+v_r}{c-v_r}}-1 \tag{10-3}$$

例如，对于 $Z=1$，$\frac{v_r}{c}=0.6$，即退行速度为 $0.6c$。

第二节　主要现代宇宙模型

今天，主流的宇宙学说是大爆炸宇宙论。它经历了继承和发展，也经受了批驳和诘难。经过近 100 年的曲折历程，终于成为一门具有现代意义的精确的学科。本节将介绍

几种主要的现代宇宙模型,作为了解大爆炸宇宙学的历史背景和传承关系。

一、爱因斯坦静态宇宙模型

1915年爱因斯坦发表了广义相对论,对万有引力理论作了划时代的变革。他把引力解释成空间弯曲效应(见图10-8),乙物体受甲物体的万有引力作用而运动,是因为甲物体的质量改变了周围空间,使空间弯曲,而乙物体由于处在弯曲空间中才产生了运动。空间的弯曲程度,取决于空间内质量的分布。爱因斯坦导出了引力场方程来描述空间状态。1917年爱因斯坦将引力场方程应用于整个宇宙,希冀建立现代意义上的宇宙模型。为求解方程,他提出了"宇宙学原理"作为基本假设。这个原理认为,就大尺度来看,宇宙物质的分布是均匀的和各向同性的。当然,在小尺度上宇宙并不均匀亦非各向同性,甚至在10^8光年的尺度上,我们也能发现超星系团。然而,当我们察看最深远的星系图像,星系间的距离达到10^9光年时,就会发现星系的分布确实呈现均匀和各向同性。图10-9是6°见方的深空星系图,每一点表示一个星系。在图中所计数的10^4余个星系中,平均位置距离我们约在$2.0\times10^9\sim3.0\times10^9$光年。在这个尺度下,星系的分布几乎是随机的,也就是均匀和各向同性的。从这个意义上可以说,宇宙学原理的假设符合观测实际,而且它成了现代宇宙学说共同遵循的基础。



图10-8 物质的引力使空间弯曲

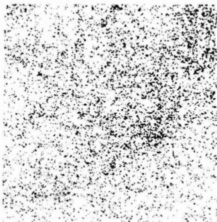


图10-9 深空星系图

当时,传统观念认为宇宙是静止的,但爱因斯坦在他的广义相对论引力场方程中却找不到静态解。因为引力场方程中只有引力,没有斥力。为了得到静态解,爱因斯坦在方程中人为地加入了一个具有等效斥力作用的"宇宙常数"项(记作Λ),以抗衡引力,从

而获得了一个有限无边，也没有中心的均匀的静态宇宙解，称为爱因斯坦静态宇宙模型。爱因斯坦宇宙模型可看成是四维空间中的一个三维超球面。为了便于理解，通常以一个三维空间中的二维球面作类比。球的面积是有限的，但沿着球面没有边界，也无中心，球面保持静止。由于这是一个有限的宇宙模型，不存在奥伯斯佯谬。

随着河外星系退行的发现，人们认识到宇宙在膨胀，爱因斯坦的静态模型被否定了。后来，人们又证明这个模型是不稳定的，只要对其有小的扰动，就会雪崩式地膨胀或收缩，因而实质上不可能保持静态。爱因斯坦放弃了宇宙静止的观点，后悔在引力场方程中引入宇宙常数项，认为这是他一生中最大的错事。下面我们将会看到，宇宙常数在今天又受到了重视，而宇宙有限无边的观念却受到挑战。尽管如此，爱因斯坦静态宇宙模型仍被认为是第一个具有现代科学意义的宇宙学解。

二、弗里德曼和勒梅特宇宙模型

1922 年，苏联数学家弗里德曼（A. Фридман）解爱因斯坦引力场方程，并未人为地引入宇宙常数项，得到 1 个静态而不稳定的特解以及 3 个均匀和各向同性的通解，这 3 个通解都反映了宇宙是膨胀的。与这种解对应的宇宙称为弗里德曼宇宙模型。对应于这 3 个解，弗里德曼宇宙模型分为三种类型，分别与表示空间弯曲的曲率指数 K 的取值有关（见图 10－10），K 能取 1，0 和 －1 三个值。$K=1$ 对应于三维球面空间，是一个有限的封闭宇宙。宇宙从某一点开始膨胀，到一定时候膨胀将停止，并转为收缩。最后，所有物质将聚集成高密、高温状态；然后将会反弹，开始新的膨胀过程。$K=-1$ 对应于三维双曲面空间，是开放的无限宇宙，宇宙膨胀将无限地继续下去；$K=0$，对应于三维平直空间，宇宙膨胀将趋向于一个临界值（见图 10－11）。弗里德曼宇宙模型是一个膨胀着的体系，从广义相对论引力场方程得出的这个膨胀解，反映空间存在一个奇点，因为膨胀正是从这个物质密度无限大的奇点开始的。奇点是当前正在探讨的一个课题。爱因斯坦的广义相对论是适用于宏观和宇观世界的引力理论，又称经典广义相对论。当代的理论物理学家正在探索适合于微观世界的引力理论，即把广义相对论与量子力学相结合，创立引力的量子理论。若在奇点附近应用引力的量子理论，或可避免奇点问题。

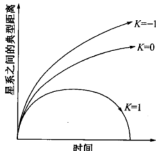


图 10－10 弗里德曼宇宙模型的三种类型

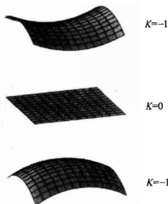


图 10－11　宇宙对应的 3 种可能的曲面空间

天文学家定义一个临界密度 ρ_{crit}，它取值

$$\rho_{crit} = \frac{3H^2}{8\pi G} \qquad (10-4)$$

式中：H 为哈勃常数；G 为引力常数。设宇宙的平均密度为 ρ，如果 $\rho > \rho_{crit}$，则 $K = 1$，宇宙是闭合的；如果 $\rho = \rho_{crit}$，则 $K = 0$，宇宙处于开放和闭合的边界上；如果 $\rho < \rho_{crit}$，则 $K = -1$，宇宙是开放的。宇宙的实际密度是大于还是小于临界密度，这是需要由观测决定的。事实上，如果把我们观测到的所有物质统统累计起来，所求得的宇宙平均密度就远小于临界密度。但是，在下文中，我们将看到通过对微波背景辐射的探测，与其结果相应的宇宙平均密度是十分接近于临界密度的。

1927 年，比利时天文学家勒梅特（A. G. Lemaître）结合当时已发现的星系退行现象，重新研究了弗里德曼宇宙模型，用哈勃常数随时间的变化描述宇宙演化，得出大尺度宇宙空间随时间膨胀的概念，提出了勒梅特宇宙模型。

1929 年，哈勃定律发现后，弗里德曼宇宙模型和勒梅特宇宙模型受到广泛重视。1932 年，勒梅特又进一步提出宇宙由一个高温、极密的"原始原子"开始膨胀的宇宙起源理论。这些后来都成为大爆炸宇宙学的基础。

三、稳恒态和准稳恒态宇宙模型

1948 年，英国天文学家邦迪（H. Bondi）、霍伊尔（F. Hoyle）和戈尔德（T. Gold）提出完全宇宙学原理，认为宇宙的性质不仅在空间上是均匀的、各相同性的，而且在时间上

也处于稳恒状态。在完全宇宙学原理的前提下，他们建立了稳恒态宇宙模型。这个模型认为，宇宙是无限的，没有开端也没有终结，而且一直保持同样的状态。实际上，这是一个单调膨胀的宇宙模型，是弗里德曼宇宙模型的一个特例，但没有奇点困难。稳恒态宇宙模型要求在宇宙膨胀过程中，物质密度不变，物质就必须连续不断地从虚空中创生。创生率是每 10^9 年在 1 立方米空间内产生 1 个氢原子。在 20 世纪 70 年代早期以前，这个理论曾经长期与大爆炸宇宙学相颉颃，受人信奉。之后，有越来越多的观测证据有利于大爆炸宇宙学，稳恒态宇宙模型逐渐被人抛弃。

1993 年，霍伊尔、美国天文学家伯比奇(G. Burbidge)和印度天文学家纳利卡(J. V. Narlikar)结合新发现的天文现象，发展了稳恒态宇宙模型，提出了准稳恒态宇宙模型。这个学说认为存在一个使宇宙膨胀的标量场，作用一个负压力，与物质产生的正能量平衡。这就可以使物质在已经存在的宇宙里有新物质产生，而不必求助于一次原始的大爆炸。物质创生过程在宇宙的各个局部触发，被称为微创生事件。在宇宙空间观测到的许多高能事件，例如类星体的活动，都可以用微创生事件来说明。这个学说也试图说明元素合成、微波背景辐射、黑洞的形成、类星体的发生等宇宙事件，但在大爆炸宇宙学的成功面前显得软弱无力，而未被普遍重视。

第三节 大爆炸宇宙学

在前一节曾经提到勒梅特首次指出如果宇宙正在膨胀，那么过去一定有过一个时期宇宙处于高温、极密的状态，宇宙从那时开始膨胀。稳恒态宇宙学的创始人霍伊尔以揶揄的口吻奚落这个过程为“大爆炸”(Big Bang)。这个理论从调侃声中留存下来并发展起来，而且保留了这个名称。本节将介绍这个学说的主要内容及其形成过程。

一、元素生成理论

1946 年俄裔美国物理学家伽莫夫(G. Gamov)从考虑宇宙曾经处于高温和极密状态出发，提出在宇宙年龄的最初不到 200 s 的时候，温度曾经高于 10^9 K，这样的高温足以导致核反应极快地发生。1948 年他的学生阿尔弗(R. Alpher)与他撰写了一篇论文阐述这一理论。在发表之际，他们又请美国核物理学家贝特一起署名(由于作者的署名，这篇论文的内容被称为 $\alpha\beta\gamma$ 理论)。论文提出了在宇宙最初 3 min 内，各种轻元素(包括氢、氢的同位素氘和氚、氦及其同位素氦 3、铍和锂)的生成和丰度的改变，示于图 10-12。质子和中子结合形成氘(^{2}H)和氦的两个同位素(^{3}He 和 ^{4}He)。氘是极其活跃的，大部分氘一经形成就消耗掉了。^{4}He 是稳定的，在这 3 min 里，25%的宇宙质量结合生成了 ^{4}He。^{3}He 只

占总质量的 10^{-4}～10^{-5}。不存在相对原子量为 5 的稳定核。这有效地阻挡了较重元素的大量形成。这篇论文成功地说明了宇宙中当前的氦丰度。尽管氦元素能在恒星内部合成，但是在 100 亿年内由此产生的氦元素量，只能生成大约 2%～3% 的氦丰度，远远小于观测到的宇宙中实际存在的氦元素。

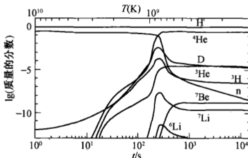


图 10-12 早期宇宙中轻元素的生成（横坐标表示时间，纵坐标表示同位素丰度随时间的变化）

元素生成理论是一种成功的理论，它的提出为关于宇宙起源的大爆炸学说奠定了坚实的理论基础，为以后的发展开创了理论探索的先河。它不仅正确地说明了氦元素在宇宙中的丰度，还正确地预言了中微子的种数。这个理论论证了中微子的种数与氦的产额有关，从而认为这个数值的最可几值为 3，最多不超过 4。更大的数值将导致生成的氦也更多，与实测值不符合。中微子的种数属粒子物理学问题，而当时宇宙学尚处于襁褓时期。由宇宙学向粒子物理学提供的信息可靠吗？事实上，到 1985 年，由粒子物理学定出的中微子数的上限为 20。直到 1989 年，新一代加速器大正负电子对撞机的实验终于把中微子的数值确定为 3，即自然界只存在电子中微子 ν_e，μ 子中微子 ν_μ 和 τ 子中微子 ν_τ 三种。元素生成理论的预言终于被证实了，它的正确性又获得了一个重要证据。

宇宙中氦元素丰度和中微子种数是证实大爆炸宇宙学成功的两个观测证据。下面将介绍另一个更重要的观测证据。

二、宇宙微波背景辐射

（一）宇宙微波背景辐射的预言

还是在 1948 年，阿尔弗和赫尔曼（R. Herman）合作，深入探讨了宇宙早期的状态，提出那时宇宙充满了辐射，时至今日，剩余辐射还可能以低强度的微波背景被探测到。

在宇宙相当年轻时，它的温度远高于 3.0×10^3 K，所有原子都被离解。宇宙是由原

子核和电子组成的等离子体。自由电子特别容易把辐射散射掉，这就是说辐射传播不远就会被散射，当时的宇宙是不透明的。随着宇宙膨胀，密度下降，温度也下降，于是达到了温度低于 3.0×10^3 K 的那一点。在较低的温度下，电子与原子核(主要是氢核，即质子和氦核，即 α 粒子)结合形成原子。中性原子非常不容易吸收辐射，于是宇宙对于辐射已经变得透明了。这个时期在大爆炸开始后的 3.8×10^5 年，称为复合时期或退耦时期。

阿尔弗和赫尔曼从理论上推导了一个计算宇宙背景辐射温度的方程式，他们求得当前温度约 5 K。方程式中包含一些参数，当时这些参数没有像现在这样准确，如果把现在所测定的各个参数代入公式，背景辐射温度应是 2.7 K。这个辐射绝大部分落在电磁波谱的射电和红外部分，信号十分微弱。在很长时期，探测技术都难以实现有效的测量。何况在那个时代人们普遍接受稳恒态宇宙论，这样就没有多少动力去完成这个困难的测量任务了。

(二) 宇宙背景辐射的发现和探测

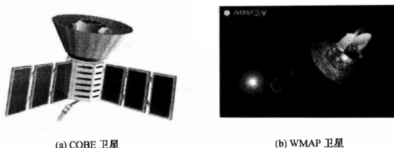
1965 年，美国贝尔电话实验室的两位科学家彭齐亚斯(A. Penzias)和威尔逊(R. Wilson)利用他们设计并安装的高灵敏度天线(参看第三章图 3-21)在电磁波的微波段(波长 7.35 cm)探测到了一种相当于温度为 3.5 K 的辐射。他们能够确定这种辐射均匀地来自天空的四面八方，但是不知道它们的起源。与此同时，普林斯顿大学的一个研究小组正在制造一架射电望远镜，打算探测“原始火球”辐射的遗迹。当贝尔电话实验室和普林斯顿大学的科学家们彼此获悉对方的研究工作后，理论与观测取得了一致。

宇宙背景辐射的发现直接证实了大爆炸宇宙学的预言，是大爆炸宇宙学的又一个重要观测证据。从此以后，大爆炸宇宙学受到普遍重视，被誉为标准宇宙模型。随着理论研究的不断深入和观测事实的不断丰富，这一学说成为宇宙学中的主流学说。

宇宙背景辐射实在太重要了，以至于美国宇航局决定发射一颗卫星对之作全波段(从微波到红外)的精确测量。1989 年宇宙背景探测(COBE)卫星发射升空[见图 10-13(a)]。精确的测量显示宇宙背景的温度为 2.725 K，而且还发现了宇宙背景辐射具有 10^{-5} 量级的微小的各向异性。这个发现为人们显示了今天宇宙大尺度结构(星系、恒星形成)起源之所在。宇宙背景辐射实际上是人们能够直接看到的最远，也是最早的信号；它所展示的各向异性，实际上是最远，也是最早的宇宙图像，相当于宇宙幼年(38 万岁)的照片。

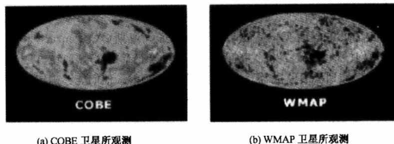
2001 年，美国宇航局又发射了威尔金森微波各向异性探测(WMAP)卫星[见图 10-13(b)]，在性能上比 COBE 卫星改进了许多。由 WMAP 卫星测出的宇宙微波背景辐射各向异性的图像，显然比 COBE 卫星测出的要清晰得多(见图 10-14)。同时，天文学家建立了理论模型来计算宇宙微波背景辐射的起伏所对应的空间几何结构，发现 WMAP

的观测数据符合宇宙空间是平直的情况，这是从观测初步证实了宇宙空间的几何结构（见图 10－15）。这也反映了宇宙的平均密度十分接近于临界密度，那么宇宙中除了可观测物质以外，必定存在更大量的不可见物质。



(a) COBE 卫星　　(b) WMAP 卫星

图 10－13　探测宇宙微波背景辐射的两颗卫星



(a) COBE 卫星所观测　　(b) WMAP 卫星所观测

图 10－14　宇宙微波背景辐射的各向异性

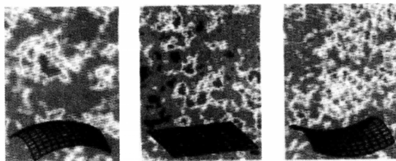


图 10－15　宇宙微波背景辐射的起伏所对应的空间几何结构理论模型
（中间的图像对应于 WMAP 卫星的测量）

三、宇宙的暴胀

虽然大爆炸宇宙学取得了很大成功，但是随着研究的深入，遇到了若干疑难问题。主要有磁单极疑难、视界疑难和平直性疑难。

在宇宙极早期曾经经历了“大统一时期”，这是指强相互作用力、电磁相互作用力和弱作用力统一的时期。与之相关的大统一理论预言存在磁性单极。有一些粒子会产生磁场，并不是由于电荷运动产生的。磁单极周围的磁场看起来就像质子周围的电场。根据这个理论，在大爆炸时应该产生了大量的磁单极，它们应该留存到现在。然而，人们一个也没有探测到。这是磁单极疑难。

前面的叙述告诉我们来自天空各个方向的微波背景辐射是高度均匀和各向同性的（偏离度只及 10^{-5}）。这表明至少在宇宙年龄约为 38 万岁时，宇宙物质在空间的分布是高度均匀的。这种状态只有当物质之间有频繁的相互作用才能达到。相互作用传递的最大速度是光速，从宇宙诞生到某一年龄，光传播的最大范围称为粒子视界（简称视界），在这个范围内的任何两点之间均可能曾经发生过相互作用。因此，视界也可看做是有因果联系的最大范围。距离超过视界的两点之间不可能有从一点对另一点施加过的作用。按照大爆炸宇宙学说，宇宙尺度与视界都随时间增长，但前者比后者慢得多。例如，在大统一时期，宇宙尺度为 0.03 m，视界为 3×10^{-28} m，于是在宇宙尺度范围内包含了 $(10^{26})^3=10^{78}$ 个无因果联系的区域。到了退耦时间，宇宙尺度和视界分别为 10^{23} m（增长了约 10^{25} 倍）和 10^{21} m（增长了约 10^{49} 倍），但是无因果联系的区域仍有 $(10^2)^3$ 个。因此，宇宙背景辐射高度的各向同性和今天观测到的基本均匀的宇宙大尺度物质分布，均无法得到解释。这是视界疑难。

今天观测到的宇宙中的物质（包括看得见的物质、暗物质和辐射）的总和，其密度虽然明显小于临界密度，但相差并不很大，两者至多只差几倍。如果按已知的膨胀规律倒退回去，宇宙早期的物质密度应十分接近临界密度，而且接近的程度十分惊人，差别只在小数点后的第几十位上。如何解释宇宙早期的物质密度如此接近临界密度的原因呢？也就是说使宇宙早期的几何性质如此接近平直的规律是什么？用纯粹的偶然性是难以说明的。这是平直性疑难。

1979 年，美国物理学家古思（A. Guth）在研究中首先提出了磁单极疑难。两年后，通过研究宇宙早期的真空相变（相变是物质的物理状态的变化，如水改变为水蒸气），他提出宇宙在年龄 10^{-35} s 的时候，经历了一次“暴胀”，即在极短的 10^{-33} s 的时间内，宇宙尺度猛增了 10^{40} 倍。设想一粒灰尘在转瞬之间胀大成银河系的大小，还远远比不上这种暴胀的速度。一旦暴胀结束，宇宙便恢复正常膨胀。古思认为，所有的磁单极是在暴胀前

产生的，后来因暴胀而远远地四散分离，在巨大的空间内显得十分稀少，因而难以碰上它们。

宇宙暴胀也能解决视界疑难。原来的标准宇宙模型把大统一时期的宇宙尺度过高估计了 40 多个量级。实际上那时的宇宙尺度比视界小得多，有足够的时间达到均匀和各向同性，因而不存在视界疑难（见图 10－16）。

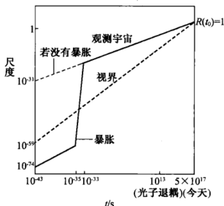


图 10－16 在标准宇宙模型和暴胀宇宙模型中宇宙尺度随时间的变化

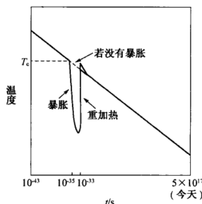


图 10－17 暴胀对温度变化的影响

古思也意识到，为了解决磁单极问题提出的暴胀理论，也可以解决平直性疑难。我们只能看到光在宇宙年龄里能穿越的距离之内的事物。只要宇宙经历了一次大规模暴胀，我们所能看到的范围就只能是宇宙的一小部分，它就显得平直。这也类似于在地球上，当我们看到物体表面一小块时，它看起来很平坦，可以说暴胀理论正是在这一点上得到 WMAP 卫星观测事实的支持。

暴胀假设能与高能粒子物理学相印证，而且与大爆炸宇宙学衔接得极好。暴胀阶段温度有剧烈下降，但是暴胀后的真空相变释放能量，形成大批粒子使宇宙重新加热，补偿了温度的下降，因此暴胀对此后宇宙温度的估算不带来重要影响（见图 10－17）。

四、宇宙的加速膨胀

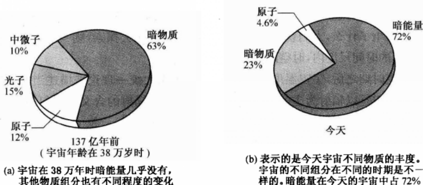
宇宙的膨胀，既有观测事实的支持，又得到理论的完美阐释，可谓是不争的事实。但是，宇宙物质之间引力的存在，导致人们长期以来推论宇宙的膨胀只能减速，不可能等速，更不可能加速。此外，观测得到的可见物质的密度与暗物质密度之和远小于临界密度。这与由暴胀理论所预言，并由 WMAP 卫星的观测所证实的关于宇宙平直性的事实

不符，也与上述关于宇宙减速膨胀的思考相悖。

1998—1999 年间以美国天文学家里斯(A. G. Riess)和玻尔马特(S. Permutter)分别领衔的两个团队，对遥远星系内的 Ia 型超新星进行观测。他们把 Ia 型超新星作为“标准烛光”，都发现了那些遥远的 Ia 型超新星的亮度比预期的更暗(也就是说更加遥远)。如果按照既有的观念，认为由于引力的作用，宇宙的膨胀速度会减小，那么天体不可能到达如此遥远的距离。要想解释观测结果，唯一的可能是宇宙膨胀越来越快。他们由此得出结论：宇宙不是在减速膨胀，而是在加速膨胀。加速膨胀的发现意味着存在斥力，而且当前的宇宙从整体上看应该是以斥力为主。

回顾历史，1917 年当爱因斯坦首次发表现代宇宙学奠基论文时，为了获得静态宇宙而引入了代表斥力的宇宙学常数 Λ。后来，发现了宇宙在膨胀，宇宙并非静态，爱因斯坦放弃了这个常数。如今发现了宇宙的加速膨胀，它又一次进入了人们的视野。宇宙学常数 Λ 相当于真空具有负的压强，因而产生斥力。这种负压强称为暗能量。

暗能量有一种奇特的性质，就是在宇宙演化的进程中，它的密度保持不变。因此，随着宇宙膨胀，它的总量以及在宇宙全部物质中所占的份额都在不断增加。所以说，在宇宙演化的不同时期，不同物质分布的情况是不一样的。例如，在宇宙 38 万年时，暗能量几乎不存在[见图 10 - 18(a)]，而现在则占有极大部分。据估算，当前宇宙中普通物质约占 4.6%，暗物质约占 23%，暗能量约占 72%[见图 10 - 18(b)]。



(a) 宇宙在 38 万年时暗能量几乎没有，其他物质组分也有不同程度的变化

(b) 表示的是今天宇宙不同物质的丰度。宇宙的不同组分在不同的时期是不一样的。暗能量在今天的宇宙中占 72%

图 10 - 18　今天的宇宙和 38 万年的宇宙各种物态丰度的分布

五、宇宙的历史

在宇宙的演化过程中，它的温度从 10^{32} K 下降到今天的约 2.7 K，要跨越 32 个量级。这不会是简单的量变过程。在许多特定的温度上，宇宙物质的性质会有特征性的变化，

产生了对宇宙演化有重大影响的过程。以下叙述的宇宙历史，展示宇宙演化过程中主要的特征性事件。

（一）宇宙的早期演化史

大爆炸宇宙学已经成为一门相当成熟和精确的学科，它对于宇宙演化的历史，能给出言之有据的描述。其根据建立在物理学中的广义相对论、原子核物理、基本粒子物理、热力学和统计物理等方面的知识以及大量天文观测的事实之上。宇宙从一次大爆炸开始到今天已经有了 137 亿年的历史。

最初的宇宙缩小到几乎一个点上，处于极度高温、高密的状态。随后宇宙突然膨胀，温度、密度都会降低，这个过程类似于炸弹爆炸，因而被霍伊尔讥称为“大爆炸”，而人们也接受了这个名称。但是，宇宙大爆炸与普通爆炸有根本的区别。在普通爆炸中，炸药集中在空间内的一点中，爆炸后物质四散飞入周围空间。但是，宇宙大爆炸的情况则不同，那是整个空间在膨胀，而不是物质从一点向四周飞散。空间有可能是封闭的，也可能是平直的或开放的。平直和开放的空间都是无限的，但在这两种情况下，宇宙也可以发生大爆炸。这时无限空间中的每一小块空间都膨胀长大，形成我们今天所能观测到的宇宙。

宇宙从开始爆炸起的第一个 10^{-43} s，这么一个极其短暂的时间称为普朗克时期。在这时期之内发生了什么，人们就目前所掌握的物理学规律去探索，则一无所知。很有可能，在这么短的时间尺度内，时空的连续结构是破损的。

在普朗克时期之后，宇宙温度高达 10^{32} K，必须用大统一理论来描述当时的物理状态。这时的宇宙是以辐射为主的。在这种极端高温下，辐射的含义不仅包括高能光子，而且也包括热运动速度接近光速的重子（主要是质子和中子）。粒子与反粒子对在热碰撞中大量产生。但是，随着宇宙膨胀并持续冷却，粒子与反粒子不断相遇而湮灭，每湮灭一对便产生两个光子把能量带走。由于自然界中正、反粒子的性质终究不是完全对称的，李政道和杨振宁发现的弱相互作用中的宇称不守恒定律决定了这一情况。研究表明每 10^{10} 个正、反粒子的湮灭，会有一个正粒子剩余，即产生了 $1/10^{10}$ 的不对称。而正是这剩余的正粒子构成了我们今天的宇宙。如果没有这一点不对称，现在的宇宙内将都是辐射，我们就不会存在了。同时，这也说明了对于留存到今天的每一个重子，就一定有 10^{10} 个光子。这正是当前宇宙中重子与光子数密度的比例。这一过程持续到宇宙年龄的 10^{-35} s。图 10－19(a)表示 $t<10^{-35}$ s 时，正、反重子完全对称，图 10－19(b)表示 $t\approx10^{-35}$ s 时，产生了 $1/10^{10}$ 的不对称，图 10－19(c)表示 $t>10^{-6}$ s 时，成对的都已湮灭，显出了极不对称。

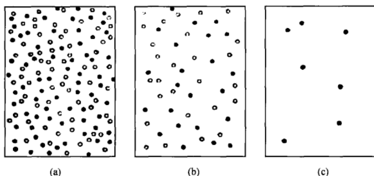


图 10-19 重子不对称的形成过程

宇宙年龄 10^{-35} s 时,宇宙温度已降低到 10^{28} K,粒子的热运动能量已极大地降低,上述改变重子数的过程已不再能发生,于是宇宙中的重子数便固定下来了。而正在这时,宇宙开始了暴胀,持续 10^{-33} s 的时间。之后,宇宙膨胀速率和温度又恢复到暴胀之前。

当宇宙年龄到 10^{-6} s 时,温度下降到 10^{13} K,夸克被全部结合到强子中去了。夸克是构成强子的基本粒子,现在已经发现了 6 种。强子是参与强相互作用的基本粒子,包括重子和 π 介子等其他介子。

当宇宙年龄到 1 s 时,温度下降到 10^{10} K,从此以后中微子与物质的作用变得极其微弱,称为中微子与物质退耦。这些中微子现在应遍布于宇宙各处,正像宇宙背景辐射。有人估计中微子就像 2 K 的气体,这种低能量的中微子的探测极度困难。然而,它们的数量大得惊人,只要中微子具有微小的静质量,即使低到电子质量的 1/40 000,中微子的总质量便会超过核物质的 10 倍,成为暗物质的重要组成部分。有可能正是中微子的团块构成引力中心,从而在后来形成了星系团。也正是在这时,质子与中子出现了互相转换的可能性,质子与中子开始结合形成氘核。

当宇宙年龄到达 3 min 时,温度下降到 10^{9} K。虽然质子与中子可结合成氘核,但氘核也能在热碰撞中被光分裂,因此氘核的大量合成,须等到温度继续下降到某一特征温度时,才能使分裂作用失效。这个温度正是 10^{9} K。从这时起宇宙才有大量的原子核。首先是氘核,开始大量形成,而后继的核过程也会很快跟上,合成了氦 3 和氦 4。氦 4 则作为稳定的氦同位素大量累积起来。后续的核合成过程能产生极少量的锂 7。这就是我们前面描述过的核合成过程。在上述核合成过程中,宇宙依然在膨胀,温度依然在下降,所以核合成过程不会长久持续。实际上到宇宙年龄约 1 h,温度下降到约 10^{8} K 时,宇宙早期的核合成就完全结束了。

宇宙年龄到达 38 万年时,温度下降到 3×10^{3} K。光子与实物失去了有效的碰撞,这

就是光子的退耦。这时的宇宙已从原来的以辐射为主，转化为以物质为主的时期。各种天体都是在退耦时期之后陆续形成的。退耦后的光子被称为背景光子，它是一种很冷的光子气体，产生了今天探测到的宇宙背景辐射。

(二) 宇宙结构的形成

COBE 卫星，尤其是 WMAP 卫星探测了宇宙背景辐射，它们的观测明确地显示在辐射和物质退耦之前宇宙的密度分布出现微小的起伏(参见图 10－14)。天文学家认为星系正是从这种起伏中生长起来的。在星系和恒星形成之前，宇宙基本上不发光，进入黑暗时期。约在宇宙 4 亿岁时，形成第一代恒星，宇宙回到了“光明时代”。恒星的光使星际介质再一次电离，接着便是漫长的星系、恒星、行星形成和发展的时代，乃至于在某些条件合适的行星上产生了生命。随着宇宙膨胀，体积增大，由于宇宙中暗能量的密度不变，暗能量大量形成，宇宙便进入加速膨胀时期。

今天的宇宙有复杂的结构，这是最基本的观测事实，因此结构如何形成的问题，是宇宙学理论所必须正确回答的。大爆炸宇宙学认为，从宇宙年龄 38 万年时留下宇宙背景辐射的不均匀性可以看出，在物质为主阶段开始，已经埋下了结团的种子。但是结构形成的成熟理论还没有建立。从理论上来说，结构形成虽发生较晚，但与宇宙早期发生过的事件紧密地联系着；此外，理论探讨必须考虑暗物质和暗能量在宇宙结构中的重要作用，甚至是主导作用，这些问题当前还没有透彻地了解清楚。从观测上来说，宇宙内星系的大尺度分布还不十分清楚。因此，关于星系、星系团和超星系团的形成问题，当前天文学家还不能得出肯定的结论。有两种不同方向的可能性：一种是“从顶往下”，另一种是“从底往上”。这两种景象展示于图 10－20。在从顶往下的景象里，最大规模的结构首先形成，例如形成了质量如超星系团的物质团块，接着因引力而收缩。后来，随着密度增大，质量较小(星系团质量)的结构能够各自收缩。最后，在更小的尺度上重复这一过程，这些更小的团块进一步碎裂，形成各个星系。在从底往上的图景里，星系首先形成。星系相互吸引而靠近形成星系团，星系团相互吸引而靠近形成超星系团。在这两种图像之间做抉择的时候，重要的是要了解宇宙中暗物质的性质，因为宇宙动力学和星系形成是由暗物质起主要作用的。

图 10－21 给出一个在冷暗物质宇宙中大尺度结构形成和演化的计算机模拟结果，展示三个不同时期的图像。模拟计算是由得克萨斯大学星系形成研究组在得克萨斯高级计算中心完成的。选取了一个 154 百万秒差距大小的体积，处理了其中的 2.70×10^6 颗粒子。这个模拟计算能展现我们所观测到的各种尺度的结构，但还不能最终回答上面的问题。图 10－22 展示了宇宙演化的各主要阶段。

(a) 从顶往下　　(b) 从底往上

图 10-20 星系形成的景象

(a)142.6 亿年前　　(b)120.4 亿年前　　(c) 现在

图 10-21 宇宙各种尺度结构的模拟计算

图 10-22 宇宙演化示意图

现代宇宙学经过近 100 年的发展，已经成为相当系统的学科，进入了精密宇宙学的时代。局处于宇宙一隅小小地球上的人类，居然能够如此深入地了解宇宙，不能不说是人类智慧的骄傲。爱因斯坦曾经说过："宇宙中最不可理解的是，宇宙居然是可以理解的！"

参考文献

[1] 胡中为,萧耐园. 天文学教程(上册). 北京:高等教育出版社,2003.

[2] 朱慈墭. 天文学教程(下册). 北京:高等教育出版社,2003.

[3] 胡中为. 徐伟彪. 行星科学. 北京:科学出版社,2008.

[4] 吴鑫基,温学诗. 现代天文学十五讲. 北京:北京大学出版社,2005..

[5] 温学诗,吴鑫基. 观天巨眼——天文望远镜的 400 年. 北京:商务印书馆,2008.

[6] 王世杰,宣焕灿,郑永春. 蟾宫览胜——人类认识的月球世界. 上海:上海科学技术出版社,2007.

[7] 苏宜. 天文学新概论(第四版). 北京:科学出版社,2009.

[8] 俞允强. 物理宇宙学讲义. 北京:北京大学出版社,2006.

[9] 赵仁扬. 太阳射电辐射理论. 北京:科学出版社,1999.

[10] 彩图百科全书・宇宙. 上海:上海科学技术出版社,上海科技教育出版社,2005.

[11] 宣焕灿. 天文学史. 北京:高等教育出版社,1992.

[12] 宣焕灿,萧耐园,刘炎. 科学名著赏析・天文卷. 太原:山西科学技术出版社,2006.

[13] 库特纳,M. L.. 天文学:物理新视野. 萧耐园,胡方浩译. 长沙:湖南科技出版社,2005.

[14] 普林嘉,R.. 图说宇宙. 萧耐园译. 长沙:湖南科技出版社,2008.

[15] 梅利亚,F.. 无限远的边缘. 萧耐园译. 长沙:湖南科技出版社,2006.

[16] 普林嘉,R. ,行星探奇. 萧耐园译. 长沙:湖南科技出版社,2010.

[17] 巴利,J. ,瑞普斯,B.. 恒星与行星的诞生. 萧耐园译. 长沙:湖南科技出版社,2009.

[18] 皮特森,C.. 布兰特,J.. 宇宙新视野. 胡中为,刘炎译. 长沙:湖南科技出版社,2006.

[19] 卢米涅,J.-P.. 黑洞. 卢炬甫译. 长沙:湖南科技出版社,1998.

[20] 徐遐生. 物理学宇宙. 李太枫,等译. 台北:明文书局,2001.

[21] 林完次,渡部润一. 星座奥秘·探索图典. 杭州:浙江教育出版社,2002.

[22] McFadden, L. - A. ,Weissman,P. ,Johnson,T.. 太阳系百科全书. 北京:科学出版社,2007.

[23] Cox,A. ,Allen's Astrophysical Quantities (Fourth Edition),London:Springer,1999.

[24] Seeds,M. ,Foundations of Astronomy(Sixth Edititionion),Pasific Grove:Brook/scole,2001.

[25] Lang,K. ,Encyclopedia of the Sun,New York:Cambridge University Press,2001.

[26] Burbidge,G. , A Different Approach to Cosmology,Physics Today,Apr. 1999.